

INSTITUT FÜR  
VERBUNDWERKSTOFFE GMBH



Schriftenreihe

Band 19

---

Wolfram Reuter

---

**Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde  
mit Class-A-Oberflächenqualität für den  
Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut**

Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.)

---



UNIVERSITÄT  
KAISERSLAUTERN

# IVW - Schriftenreihe Band 19

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

---

Wolfram Reuter

Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde  
mit Class-A-Oberflächenqualität für den  
Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut

**Institut für  
Verbundwerkstoffe GmbH**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Reuter, Wolfram  
Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächen-  
qualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut / Wolfram Reuter. –  
Kaiserslautern : IVW, 2002  
(IVW-Schriftenreihe ; Bd. 19)  
Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2001  
ISBN 3-934930-15-8

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Erwin-Schrödinger-Straße  
Universität Kaiserslautern, Gebäude 58  
67663 Kaiserslautern

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Universität Kaiserslautern  
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2002

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X  
ISBN 3-934930-15-8

## Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Wolfram Reuter  
aus Mainz

Tag der mündlichen Prüfung: 28. August 2001

Vorsitzender: Pr. Dr. C. W. Dankwort  
Referent: Pr. Dr.-Ing. M. Neitzel  
Korreferent: Pr. Dr.-Ing. W. Brockmann

D386

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während der Jahre 1997 bis 2001 im Rahmen der Zusammenarbeit der BMW AG und der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Geschäftsführer des Instituts Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel, der durch seine Kooperationsbereitschaft diese Promotion an der IVW GmbH erst möglich gemacht und durch seine Anregungen mitgestaltet hat. Ferner bedanke ich mich für die institutsseitige Betreuung, die fachliche Unterstützung und die kritische Durchsicht der Arbeit bei Herrn Dr.-Ing. Mitschang, Abteilungsleiter für Verarbeitungstechnik an der IVW GmbH.

Für den Prüfungsvorsitz möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. C. W. Dankwort, für die Übernahme des Korreferats bei Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Brockmann bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Torsten Flemming, Projektleiter bei der BMW AG, danke ich ganz herzlich für die hervorragende Betreuung und Unterstützung seitens BMW von meiner Einstellung als Doktorand bis zur Fertigstellung der Arbeit. Durch seine fachliche Kompetenz und offene Gesprächsbereitschaft hat er wertvolle Ansätze eingebracht und die organisierte und zielorientierte Bearbeitung gefördert. Über die Einbindung der Dissertation in die Projektlandschaft der BMW Technik GmbH und der BMW AG konnten die notwendigen finanziellen Mittel für die Entwicklung aufgebracht und der direkte Bezug der Ergebnisse zur Anwendung hergestellt werden.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kollegen, Mitarbeitern und Studenten bedanken, die durch ihre Unterstützung zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre kontinuierliche Unterstützung und vorausschauende Förderung diesen akademischen und beruflichen Werdegang ermöglicht haben.

München, im August 2001

Wolfram Reuter

## INHALTSVERZEICHNIS

Formelzeichen.....	IX
Abkürzungen.....	X
Abstract.....	XII
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung in die Problemstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Anforderungen an Außenhautbauteile.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Hauptanforderungen.....	3
2.1.2 Die drei Außenhautbereiche.....	5
<b>2.2 Stand der Anwendungen.....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Beispielanwendungen FVK in der Außenhaut.....	8
2.2.2 Folgerungen aus dem Stand der Anwendungen.....	11
<b>2.3 Fertigungsverfahren für Außenhautbauteile aus FVK.....</b>	<b>12</b>
2.3.1 Betrachtete Fertigungsverfahren.....	12
2.3.2 Verfahrensvergleich.....	14
2.3.3 Eingrenzung auf das RTM-Verfahren.....	16
<b>2.4 Oberflächenqualität automobiler Außenhautbauteile.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Der Begriff der „Class-A-Oberflächenqualität“.....	17
2.4.2 Oberflächenklassifizierung.....	18
2.4.3 Typische Oberflächenfehler bei CFK.....	19
2.4.4 Wahrnehmung von Oberflächenqualität.....	22
2.4.5 Beurteilung durch Messverfahren.....	24
2.4.6 Optische Beurteilung.....	28
<b>2.5 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>29</b>
2.5.1 Aufgabenstellung.....	29
2.5.2 Vorgehensweise.....	30
<b>3 Das Resin-Transfer-Moulding-Verfahren.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Merkmale des RTM-Verfahrens.....</b>	<b>32</b>
3.1.1 Vorformen der Verstärkungsstrukturen.....	33
3.1.2 Der RTM-Zyklus.....	34
3.1.3 Nachbearbeitung.....	37
<b>3.2 Versuchsaufbau zur Musterteileherstellung.....</b>	<b>37</b>
3.2.1 RTM-Versuchswerkzeug.....	38
3.2.2 Schließeinheit.....	40
3.2.3 Injektionsanlage.....	41
<b>4 Materialoptimierung zur Verbesserung der Oberflächenqualität.....</b>	<b>42</b>

<b>4.1</b>	<b>Vorgaben und Randbedingungen</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Matrixsystem</b>	<b>44</b>
4.2.1	EP-Harzsysteme	44
4.2.2	Auswahlkriterien für EP-Harze	48
4.2.3	Vergleich verschiedener hochreaktiver EP-Harze	48
4.2.3.1	Viskositätsverläufe	49
4.2.3.2	Reaktivität und Glasübergangstemperaturen	50
4.2.3.3	Oberflächenqualität	54
4.2.4	Fazit	56
<b>4.3</b>	<b>Faserverstärkung</b>	<b>56</b>
4.3.1	Gewebe	57
4.3.1.1	Oberflächenqualität bei verschiedenen Geweben	57
4.3.1.2	Fazit	61
4.3.2	Multiaxialgelege	61
4.3.2.1	Oberflächenqualität mit verwirkten Multiaxialgelegen	62
4.3.2.2	Fazit	69
4.3.3	Unidirektional-Gelege	70
4.3.3.1	Oberflächenqualität mit Unidirektional-Gelegen	70
4.3.3.2	Fazit	73
4.3.4	Vergleich der Verstärkungshalbzeuge	73
<b>4.4</b>	<b>Kernmaterialien</b>	<b>76</b>
4.4.1	Oberflächenqualität mit verschiedenen Textilglasmatten	76
4.4.2	Fazit	78
<b>4.5</b>	<b>Oberflächenvliese</b>	<b>79</b>
4.5.1	Oberflächenqualität mit verschiedenen Oberflächenvliesen	80
4.5.2	Fazit	84
<b>4.6</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität</b>	<b>87</b>
<b>5.1</b>	<b>Systemanalyse für den RTM-Prozess</b>	<b>87</b>
<b>5.2</b>	<b>Prozessstabilität</b>	<b>90</b>
<b>5.3</b>	<b>Versuchsplanung und -durchführung</b>	<b>91</b>
<b>5.4</b>	<b>Modellbildung mittels schrittweiser Regression</b>	<b>93</b>
<b>5.5</b>	<b>Auswertung / Analyse</b>	<b>95</b>
5.5.1	Einfluss der Werkzeugtemperatur und der Entformzeit	98
5.5.2	Einfluss der Temperaturdifferenz	101
5.5.3	Einfluss des Nachdrucks	102
5.5.4	Einfluss der Vakuumbführung	107
5.5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	109
<b>5.6</b>	<b>Optimierung</b>	<b>110</b>
<b>5.7</b>	<b>Die Zielgröße Glasübergangstemperatur</b>	<b>114</b>
5.7.1	Mindestanforderungen an die Temperaturbeständigkeit	114

5.7.2	Regressionsmodell für die Glasübergangstemperatur	114
5.7.3	Nachträgliches Tempern und die Auswirkungen auf die Oberflächenqualität	116
5.7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	120
<b>5.8</b>	<b>Konsequenzen für den RTM-Prozess</b>	<b>120</b>
5.8.1	Die Injektionsphase	121
5.8.2	Die Nachpressphase	121
5.8.3	Die Aushärtephase	122
<b>5.9</b>	<b>Weitere Einflussgrößen</b>	<b>123</b>
<b>6</b>	<b>Die Volumenänderung des Matrixsystems bei der Bauteilherstellung</b>	<b>124</b>
<b>6.1</b>	<b>Das Schwindungsverhalten von Epoxidharzsystemen</b>	<b>124</b>
<b>6.2</b>	<b>Stand der Technik zur Untersuchung der Schwindung</b>	<b>126</b>
<b>6.3</b>	<b>Schwindungsmessungen an Epoxidharzsystemen</b>	<b>129</b>
<b>6.4</b>	<b>Ergebnisse der Schwindungsmessungen</b>	<b>133</b>
<b>6.5</b>	<b>Modellbildung und -analyse</b>	<b>135</b>
<b>6.6</b>	<b>Vergleich der EP-Systeme untereinander</b>	<b>139</b>
<b>6.7</b>	<b>Umsetzung auf die Prozessführung</b>	<b>141</b>
6.7.1	RTM-Prozess mit konstanter Verarbeitungstemperatur	143
6.7.2	Zyklisch beheizbare RTM-Werkzeuge	144
6.7.3	Nachträgliches Tempern	145
<b>6.8</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>147</b>
<b>7</b>	<b>Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität</b>	<b>149</b>
<b>7.1</b>	<b>Beschichtungen im RTM-Prozess</b>	<b>149</b>
7.1.1	Thermoplastische Folien	150
7.1.2	Gel-Coat	155
7.1.3	EP-Surfacing-Film	159
7.1.4	Inmould-Powder-Coating	161
7.1.5	In-Mould-Coating	164
7.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	164
<b>7.2</b>	<b>Nachträgliche Deckschichten</b>	<b>165</b>
7.2.1	Lackieren von Kunststoffen	166
7.2.1.1	Lackaufbau für Kunststofflackierungen	168
7.2.1.2	Einfluss der Lackierung auf die Oberflächenqualität	169
7.2.2	Grundierungen, Funktionsbeschichtungen	174
7.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	178
<b>7.3</b>	<b>Flächige Nacharbeit</b>	<b>179</b>
7.3.1	Der Einfluss flächiger Nacharbeit auf die Oberflächenqualität	179
7.3.2	Zusammenfassung der Ergebnisse	182
<b>8</b>	<b>Erreichte Oberflächenqualität von Musterbauteilen</b>	<b>183</b>
<b>8.1</b>	<b>Ist-Stand vor der Entwicklung</b>	<b>183</b>
<b>8.2</b>	<b>Ergebnisse der Optimierung der Teilsysteme</b>	<b>185</b>
<b>8.3</b>	<b>Ergebnisse der Abstimmung des Gesamtsystems</b>	<b>189</b>

9 Zusammenfassung .....	192
10 Literaturverzeichnis .....	195
11 Anhang.....	203
11.1 Anhang A: Außenhutanforderungen am Beispiel der Frontklappe .....	203
11.2 Anhang B: Beispiele für Außenhautbauteile aus der Marktanalyse .....	205
11.3 Anhang C: Verfahrensvarianten und -abkürzungen .....	209
11.4 Anhang D: Ausschnitt aus der Verfahrensübersicht.....	211
11.5 Anhang E: Aushärteverhalten für betrachtete EP-Systeme .....	213
11.6 Anhang F: Multiaxialgelege-Maschine Typ Copcentra (Firma Liba) .....	215
11.7 Anhang G: Statistische Methoden zur Versuchsplanung und -auswertung ....	216
11.8 Anhang H: Signifikanztabelle für RTM-Prozessmodell.....	220
11.9 Anhang I: Adjustierte Response-Grafiken.....	222
11.10 Anhang J: Wechselwirkungs-Grafiken für alle vier Zielgrößen .....	223
11.11 Anhang K: Predicted-Response-Grafiken an zwei Arbeitspunkten .....	225
11.12 Anhang L: Ergebnisse aus den Schwindungsmessungen .....	227
11.13 Anhang M: Adjustierte Response-Grafiken für Schwindungsmodell.....	228

## FORMELZEICHEN

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Delta_T, $\Delta T$	°C	Temperaturdifferenz
df		degrees of freedom, Anzahl Freiheitsgrade
Diff_LW	%	Veränderung der Langwelligkeit
Diff_SW	%	Veränderung der Kurzwelligkeit
$E_x^0$	MPa	Zug-E-Modul in x-Richtung
$E_y^0$	MPa	Zug-E-Modul in y-Richtung
$E_x^t$	MPa	Biege-E-Modul in x-Richtung
$E_y^t$	MPa	Biege-E-Modul in y-Richtung
$E_{xy}^t$	MPa	Torsionsmodul
E_Zeit	sec, min	Entformzeit
$G_{xy}^0$	MPa	Schubmodul
g		Gewichtung
LW_stabw		Standardabweichung der Langwelligkeit
n		Wiederholungsfaktor
N_Druck	bar	Nachdruck
m		Funktionalität
p		Anzahl Parameter, Dimensionen im Versuchsraum
RMS		Residual Mean Square
$R^2$	%	Kenngroße für Regressionsmodell
$R_{adj}^2$	%	Kenngroße für Regressionsmodell
SD, $\sigma$		Standard Deviation, Standardabweichung
SW_stabw		Standardabweichung der Kurzwelligkeit
$S_v$		Volumetrische Schwindung
$S_{Lx}, S_{Ly}, S_{Lz}$		Lineare Schwindung, in x-y-z-Richtung
T	°C	Temperatur
$T_g$	°C	Glasübergangstemperatur
$T_{g^*}, \text{End-}T_g$	°C	Maximale Glasübergangstemperatur
$T_{g0}$	°C	Glasübergangstemperatur des ungehärteten Systems
$T_{g,\text{mittel}}$	°C	Mittlere Glasübergangstemperatur nach DSC
$T_v$	°C	Verarbeitungstemperatur
V	ml	Volumen
Vak	bar	Vakuum
WZ_T	°C	Werkzeugtemperatur
$W_{ges}, W_i$		Gesamt-, Einzelwünschbarkeit
x, y, z		Raumrichtungen
$\alpha_{th}$	1/K	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
$\lambda$	$\mu\text{m}$	Wellenlänge
$\mu, \bar{y}$		Mittelwert
$\rho$	$\text{g}/\text{mm}^3$	Dichte
$\nu$	mPas	Viskosität

## ABKÜRZUNGEN

Kurzform	Bedeutung
AMP	Advanced Moulding Process
ARTM	Advanced Resin Transfer Moulding
ATC	Arnoloy Technology Coating
AZT	Allianz Zentrum für Technik
BMC	Bulk Moulding Compound
BMW	Bayerische Motorenwerke
BPA	Bisphenol A
CCM	Compression Composite Moulding
CF	Carbon Fibre
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments, Versuchsplanung
DSC	Differential Scanning Calorimetry, Dynamische Differenzkalorimetrie
ECH	Epichlorhydrin
EEVC	European Enhanced Vehicle Committee
EP	Epoxidharz
EU	Europäische Union
FEM	Finite Element Methode
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GM	General Motors
GMT	Glasmatteverstärkter Thermoplast
HC	Kohlenwasserstoffe
IHS	Insurance Institute for Highway Safety
ICM	Injection Compression Moulding
IM	Injection Moulding
IMC	In-Mould-Coating
IPC	Inmould-Powder-Coating
ISF	Inmould Surfacing Film
ISO	International Standardization Organisation
KFT	Kurzfaserverstärkter Thermoplast
LCM	Liquid Composite Moulding
LFI	Long Fibre Injection
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
LKW	Lastkraftwagen
LD	Low Density

LP	Low Profile
LPA	Low Profile Additive
LS	Low Shrink
LW	Long Wave, Langwelligkeit
NFZ	Nutzfahrzeug
OFAT	One Factor at a Time
OBT	Organoblech-Thermoformen
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat, Personal Computer
PE	Polyethylen
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylenterephthalat
PFC	Preform Compound
PMC	Powder-Mould-Coating
PMMA	Polymethylmethacrylat
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles
PKW	Personenkraftwagen
PUR	Polyurethan
PVA	Polyvinylacetat
PVC	Polyvinylchlorid
P4	Programmable Powder Preforming Process
RFI	Resin Film Infusion
RIM	Reaction Injection Moulding
RRIM	Reinforced Reaction Injection Moulding
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Moulding
SCRIMP	Seaman Composite Resin Infusion Moulding Process
SMC	Sheet Moulding Compound
SRIM	Structural Reaction Injection Moulding
SW	Short Wave, Kurzwelligkeit
TP	Thermoplast
TTT	Time-Temperature-Transition
UP	Ungesättigter Polyester
UD	Unidirektional
US, USA	United States of America
UTP	Unverstärkter Thermoplast
UV	Ultraviolett
VARI	Vacuum Assisted Resin Injection
VE	Vinylester
VOC	Volatile Organic Compounds
WIMAG	Verwirktes Multiaxialgelege
WMC	Woven Moulding Compound
WOS	Warenoberseite
WUS	Warenunterseite
WZ	Werkzeug



## ABSTRACT

The goal of this thesis was to improve the surface quality of highly reinforced polymer composites in order to make these materials applicable to the painted exterior of passenger cars.

For the evaluation of the application sector of automotive exterior components, a catalogue of requirements was drawn up from technical specifications, internal standards, and legal requirements. Components in the horizontal decorative section of the outer skin, like front hood, boot lid, and roof, have to fulfil the highest optical and structural requirements. A survey of the automobile market concerning applications of fibre reinforced plastics in the exterior of cars showed the state of the art and certain tendencies. So far, only non-reinforced, short-fiber- or random-fiber-reinforced plastics have been able to fulfil the high surface requirements. Up to now, high material prices, the lack of mass production concepts, and insufficient surface quality have prohibited serial applications of CFRP in the outer skin of passenger cars. Therefore, different manufacturing technologies for exterior components in composites were examined and compared in an overview of processes. The process of resin transfer moulding (RTM) was identified to have great potential for serial production because of its achievable surface quality together with high specific mechanical properties of the composites.

The goal of the current research was to find optimized combinations of materials, processes, and coatings, in order to realize a Class-A surface quality for CFRP parts in the RTM process. The main problem with the surface quality is the print-through of the reinforcement caused by the inhomogeneous distribution of the reinforcing fibres and the chemical and thermal shrinkage of the matrix material during processing. In order to perform a systematic investigation of the composite materials, the process parameters, and surface treatments, an experimental RTM tool with a plate cavity was designed and produced in the surface quality standard of a serial tool.

Within the material optimization the comparison of five epoxy resins showed that the system B2 was the most promising for further investigations with regard to surface quality and cycle time. Within the comparison of the fibre reinforcements, the woven fabrics displayed a minor surface quality compared to the non-woven and non-crimp fabrics. It was found out that multiaxial stitched fabrics with optimized placement technique, texturized, multifilament stitching yarns, and trikot-franse stitching pattern currently provide the best combination of surface quality and processability. Even better surface results were achieved with non-crimp fabrics that are fixed by an adhesive to a polyester mesh. However, the difficult processing and infiltration with matrix material still provide a hurdle to a possible serial application. As a result of the investigation, one type of randomly oriented cut glass mat with minimal fibre diameter and even fibre distribution was preferred as a core material to the commonly used continuous strand mats. Within the great variety of different surface veils, a few types could be identified to offer an effective reduction of long term waviness (from  $LW > 20$  to  $LW < 20$ ) and short term waviness (from  $SW > 35$

to  $SW < 15$ ). These selected surface veil types are mechanically or binder fixed and made of glass or PAN fibres with an areal weight of 50 to 80 g/m<sup>2</sup>.

Statistical methods for the design of experiments and the analysis of the results were used in the process optimization with the epoxy system B2. After the identification of the main predictors and responses a D-optimal experimental plan was designed and performed. The method of multiple regression was used to create a process model which describes the observed system behaviour and deviation to a very high degree.

It was discovered that high pressures on the liquid matrix system right after injection contribute to a high surface quality by compensating a great part of the reaction shrinkage. In order to achieve high pressures in the cavity exceeding 100 bar, the processing and tooling equipment was modified beyond conventional RTM process capabilities. Optimal settings for vacuum and temperature difference depend on tool temperature and post pressure levels. The simultaneous analysis of curing temperature and demoulding time showed that the best surface quality can be achieved if the part is demoulded from the tool as soon as the saturation  $T_g$ , depending on the current tool temperature, is reached. Longer curing times neither increase the  $T_g$  of the part nor do they improve surface quality. From these results a first strategy for high surface quality can be derived with a high tool temperature and a short demoulding time. The second strategy with a low tool temperature and a long demoulding time, however, is easier and safer to perform in terms of process stability.

In order to compare highly reactive thermoset matrix materials and to measure the volume shrinkage throughout the whole reaction, a novel shrinkage measurement cell, or dilatometer, was designed. This created the new opportunity to determine the processing shrinkage in its chemically and thermally induced proportions depending on matrix material, curing temperature, and time. Because of the good correlation of the laboratory results with the previous RTM experiments, a high experimental effort for hardware investigations to characterize new epoxy systems can be saved in the future. Matrix system B2 displayed the lowest shrinkage values in combination with a high reactivity. It could also be observed that a great proportion of the reaction shrinkage takes place very quickly after the start of reaction. Therefore, the post pressure on the matrix system must be applied as early as possible in order to compensate this shrinkage. Curing at lower temperatures always leads to lower chemical and thermal shrinkage. In comparison to literature the newly developed method presented in this thesis provides plausible results with high accuracy, and for the first time also for highly reactive thermoset systems.

Surface coatings offer the opportunity to reduce or cover surface structures and defects in order to achieve a high quality of the painted part surface. The exploration of in-process coatings lead to thermoplastic films and gel-coats as technologies with a high potential for the improvement of surface quality. In comparison, epoxy surfacing films and in-mould-powder-coatings result in more effort to adapt the materials and application methods to the current RTM process. It was shown that the post-process coating with a plastic paint system contributes to an improvement

of the surface quality. In this study different priming coat materials and thicknesses were identified that cover part of the surface texture with an acceptable structure of the coat itself. In addition, two surface finishing methods with manual sanding were found to raise the surface quality of the painted part up to the required standard if required.

The results of the different subsystems materials, RTM-process, and surface coatings can be combined in different combinations of various emphasis to the overall system of the painted RTM-part, complying with the requirements of the specific outer skin region.

Short-term solutions for outer skin parts with vertical surfaces (as A-, B-, C-pillars, sills, or rear side wings) were found and proven with sample plates for the first time. In order to achieve the high quality required for horizontal exterior components (as front hood, roof, and trunk lid) at the current state of development, a higher performance of the subsystems is necessary. But even for this Class-A surface quality, sample parts could be produced for the first time with high effort in the RTM-process. At the beginning of this investigation, sample plates produced in RTM displayed surface waviness values of  $LW > 35$  and strong fibre marking over the whole surface. With the combination of optimization results, sample plates with  $LW < 5$  could be produced. A visual evaluation could not determine any regular, oriented surface texture.

The presented work showed solutions in material-process-coating-combinations and development potential to reach the required Class-A surface quality of automobile exterior parts with advanced composites. This provides the necessary foundation for further developments with the aim of a serial application.

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der gesetzlichen Forderungen nach niedrigeren  $\text{CO}_2$ -Emissionen und niedrigerem Flottenverbrauch gewinnt der Leichtbau für alle Komponenten des Fahrzeugs an Bedeutung. Der Leichtbau bietet eine Möglichkeit, der sogenannten „Gewichtsspirale“ aus steigenden Anforderungen an Sicherheit, Komfort und Fahrleistungen und damit ständig wachsendem Gewicht von Karosserie, Ausstattung und Antriebsstrang entgegenzuwirken. Die Faserverbundwerkstoffe haben hier in bestimmten Anwendungsfällen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften gegenüber isotropen Materialien wie metallischen Werkstoffen viele Vorteile. Wie aktuelle Entwicklungen zeigen, können kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) aufgrund der hohen spezifischen Eigenschaften bei werkstoffgerechter Konstruktion zu Gewichtsvorteilen bei Strukturbauteilen von bis zu 50 % gegenüber Stahl führen [94].

In der über einhundertjährigen Geschichte des Automobilbaus spielen faserverstärkte Kunststoffe (FVK) erst seit etwa 1940 eine zunehmende Rolle (siehe [1] und [15]). Wurden zunächst metallische Werkstoffe in Einzelbauteilen substituiert, folgten bald darauf erste Fahrzeuge mit tragenden Strukturen und großflächigen Außenhautbauteilen. Beispiele aus dieser frühen Phase sind der Kabinenroller der Firma Messerschmidt (1948), der Kaiser-Sportwagen (1953) und der Alembic der Firma Glasspar, USA (1952). Weiterentwicklungen in größeren Stückzahlen sind die Fahrzeugaußenhaut der Chevrolet Corvette Stingray (1953) und die gesamte Karosserie des Lotus Elise Serie 1 (1957). Auch in den folgenden Jahren fanden die FVK immer wieder Anwendung im Karosseriebau von Fahrzeugen mit kleinen Stückzahlen und besonderen Anforderungen an Leichtbau und Design, wie Sportwagen, Roadster und Coupés. Beispielhaft sind hier der BMW M1 (1978), die Chevrolet Corvette (1983), der Pontiac Fiero (1984), der Porsche 959 (1986) und der BMW Z1 (1988). Neben unzähligen Konzept- und Prototypenfahrzeugen sind heute Karosseriebauteile aus glasfaser- und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen in einer überschaubaren Anzahl in Serienanwendungen zu finden. Aktuelle Beispiele für Serienproduktionen sind die Außenhaut des Opel Speedster (2001), die Karosserie des DaimlerChrysler Unimog UX-400 (2000) und Teile der Karosserie des Aston Martin Vanquish (2001).

Wie diese Entwicklung der faserverstärkten Kunststoffe im Automobilbau zeigt, gibt es bestimmte Hürden, die in der Vergangenheit und heute die Umsetzung in großen Stückzahlen verhindern. Dazu zählen vor allem die seit vielen Jahrzehnten gewachsene Unternehmenskultur und Infrastruktur in der Automobilindustrie, die auf die Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen aus überwiegend metallischen Werkstoffen, vor allem Stahlblech, ausgerichtet sind. Für die Umsetzung neuer Werkstofftechnologien in Großserien sind neben hohen Investitionen in die erforderliche neue Infrastruktur vor allem Expertenwissen und Methoden für die Entwicklung und Fertigung der Bauteile aus FVK notwendig. Zudem sind die Rohstoffe Kunststoff und Kohlenstofffaser in der jetzigen Situation und auch in Zukunftsszenarien deutlich teurer als die Rohstoffe Stahl und Aluminium. Diese höheren Materialkosten können je nach Stückzahl, Bauweise und Fertigungskonzept durch Einsparungen bei den Investitionen und insbesondere durch Teilereduzierung ausgeglichen oder sogar übertroffen werden. CFK bietet durch die Werkstoffeigenschaften und den Herstellungsprozess großes Potenzial zur Integralbauweise.

Im Gegensatz zur reinen Werkstoffsubstitution an einzelnen Bauteilen kann ein umfassender Funktionsleichtbau mit drastischer Reduktion der Teilezahl im Vergleich zur konventionellen Stahl- oder Aluminiumbauweise wirtschaftlich vorteilhaft sein.

Neben dem Thema der Wirtschaftlichkeit sind für einen Durchbruch der CFK-Technologie noch zahlreiche andere Herausforderungen zu meistern. Querschnittsthemen für fast alle CFK-Entwicklungen im Automobilbau sind unter anderem:

- Methodenentwicklung (Simulationswerkzeuge für Crashverhalten, Verfahrensschritte)
- Automatisierung der Verfahrensschritte, Realisierung serientauglicher Stückzahlen
- Diagnose- und Reparaturkonzept für Strukturbauteile und Außenhautbauteile
- Crashverhalten / Splittverhalten / Schadensfortschritt
- Gesetze und interne Vorschriften zu Emissionsverhalten, Arbeitssicherheit / MAK
- Langzeitverhalten / Alterung, Klimawechselbeständigkeit, Bewitterungsbeständigkeit...

Eine entscheidende Herausforderung für den Einsatz von kontinuierlich verstärkten Kunststoffen in der Fahrzeugaußenhaut ist zusätzlich die geforderte Oberflächenqualität. Die Anforderungen an die optischen und funktionalen Eigenschaften der lackierten Außenhautflächen sind in der Automobilindustrie, insbesondere im Premium-PKW-Segment, umfangreich und auf sehr hohem Niveau. Das Erreichen dieser geforderten Außenhautqualität stellt daher eine zwingende Voraussetzung für einen möglichen Serieneinsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden in diesem Anwendungsfeld dar.

In der vorliegenden Arbeit soll durch einen kombinierten Ansatz zur Optimierung von Materialien, Herstellungsverfahren und Beschichtungen diese Materialgruppe zu einem Einsatz in der automobilen Außenhaut befähigt werden. Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 im Flussdiagramm dargestellt.

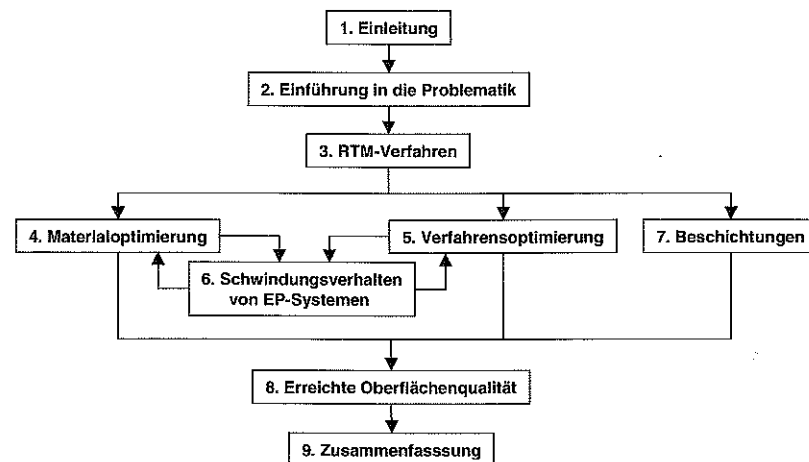


Abbildung 1.1: Struktur der vorliegenden Arbeit als Flussdiagramm

## 2 Einführung in die Problemstellung und Zielsetzung

### 2.1 Anforderungen an Außenhautbauteile

Die Anforderungen an ein bestimmtes Bauteil eines konkreten Fahrzeugs setzen sich aus verschiedenen Anforderungsgruppen zusammen: Unternehmens-, fahrzeug- und bauteilspezifische Anforderungen.

So hat das Unternehmen in der Regel unternehmensweite und deshalb für alle Produkte generell gültige Ansprüche an Qualität, Technik, Wirtschaftlichkeit und Wertigkeit. Bereits mehrere Jahre im Voraus werden die Strategien für die Modellpalette, neue Technologien und die Produktion geplant und festgelegt. Das ausgewählte Fahrzeug gibt weitere Rahmenbedingungen vor, wie den Zeitpunkt der Serieneinführung, die zu produzierende Stückzahl pro Jahr und die geforderte Wirtschaftlichkeit oder Rendite. Aus den geforderten Fahrzeugeigenschaften wie Fahrleistungen, Design und Innovationsgrad ergeben sich konkrete Bauteilanforderungen wie z.B. Bauteilgewichte und die Außenflächen. Die bauteilspezifischen Anforderungen schließen die Entwickler und Konstrukteure vor die Aufgabe, die technischen Funktionen darzustellen, den Bauraum und das Design einzuhalten und das Bauteil nach den Lastfällen und den Missbrauchslasten zu dimensionieren. Gleichzeitig müssen wirtschaftlich und technisch optimierte Konzepte für Fertigung, Montage, Service, Reparatur und Recycling entwickelt und nachgewiesen werden.

Für die Auswahl eines Bauweisenkonzeptes und eines oder mehrerer Werkstoffe und eines Fertigungsverfahrens ist die Kenntnis der gesamten Anforderungen an ein Bauteil erforderlich. Um die Einsetzbarkeit und die Potenziale von faserverstärkten Kunststoffen in der automobilen Außenhaut zu analysieren, wurde deshalb zunächst eine Anforderungssammlung für die verschiedenen Außenhautbauteile erstellt und ausgewertet.

#### 2.1.1 Hauptanforderungen

Die Anforderungen an Prozesse, Bauteile, Fahrzeuge und Werkstoffe sind in verschiedenen Formen im Unternehmen vorhanden. Zum einen gibt es Vorschriften und Normen (z.B. EU-Normen, DIN-Normen), unternehmenseigene Richtlinien (BMW-Normen, Prozessvorschriften, Prüfvorschriften, Qualitätsvorschriften) sowie Anforderungskataloge, Spezifikationen und Lastenhefte für Bauteile. Weiterhin bestehen nicht niedergelegte Anforderungen, wie z.B. Erfahrungswerte der Entwickler, Konstrukteure und Versuchsingenieure für bestimmte Bauteile.

Zur detaillierten Betrachtung der Anforderungen an die Fahrzeugaußenhaut wurden bestehende Spezifikationen, Anforderungskataloge und Lastenhefte für bestimmte Bauteile ausgewertet. Ziel dieser Anforderungssammlung war es, für die einzelnen Außenhautbauteile die allgemein gültigen Anforderungen unabhängig vom Fahrzeugmodell aufzuzeigen und dem Entwickler als Übersicht an die Hand zu geben.

Diese Sammlung der Außenhauanforderungen ist beispielhaft für die Frontklappe in Anhang A dargestellt. Die Hauptkriterien für die einzelnen Außenhautbauteile im Hinblick auf einen Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen sind zusammengefasst in Abbildung 2.1 dargestellt. Dabei sind die Hauptanforderungen nach ihrer Bedeutung angeordnet.

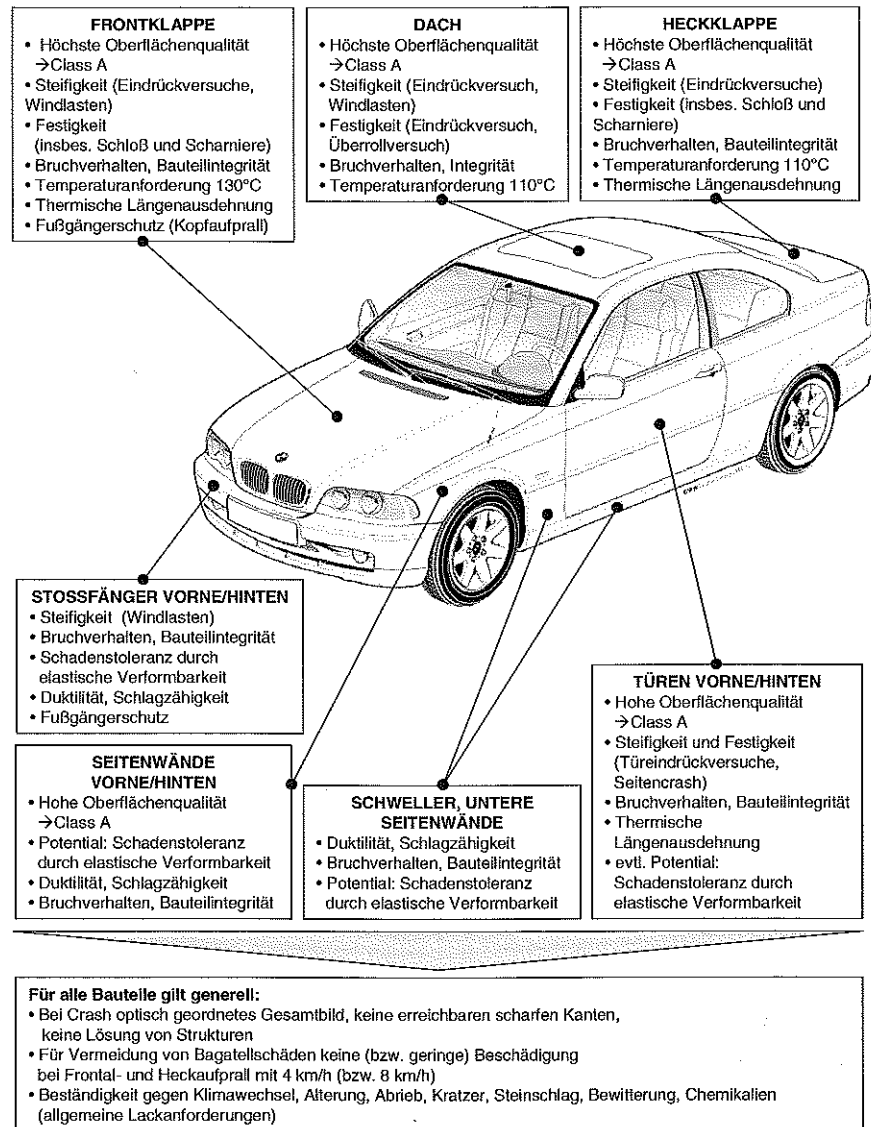


Abbildung 2.1: Anforderungen an Außenhautbauteile

## 2.1.2 Die drei Außenhautbereiche

Bei Betrachtung der Bauteilanforderungen in Abbildung 2.1 fällt auf, dass für bestimmte Bauteilgruppen sehr ähnliche Hauptanforderungen bestehen. Somit lässt sich die Fahrzeug-Außenhaut wie in Abbildung 2.2 dargestellt in drei Bereiche aufteilen.

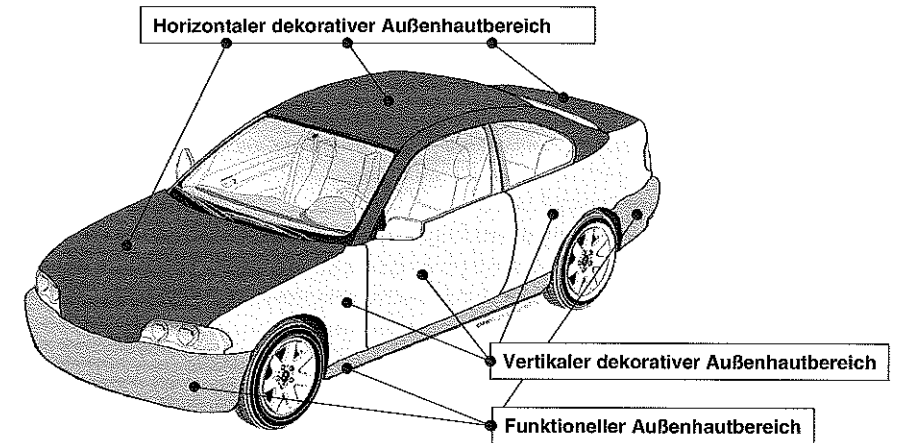


Abbildung 2.2: Verschiedene Außenhautbereiche am Fahrzeug

In den horizontalen dekorativen Außenhautbereich fallen Frontklappe, Dach und Heckklappe. Aus Bauteilgröße und Anordnung resultieren (Beul-) Steifigkeitsanforderungen aufgrund der auftretenden hohen Windlasten, aus dem Eigengewicht und der Haptik. Die Klappen müssen aufgrund der Betätigungs- und vor allem der Missbrauchslasten hohe Anforderungen an die Steifigkeit und die Festigkeit, vor allem im Scharnier- und Schlossbereich, erfüllen. Diese Bauteile liegen zudem im anspruchsvollsten Sichtbereich, da für horizontale Bauteile die höchsten Oberflächenanforderungen gelten. Das Bruchverhalten beim Fahrzeugcrash ist insbesondere bei Front- und Heckklappe als absolut kritisch einzustufen, da Mindestanforderungen für Insassen- und Partnerschutz zwingend erfüllt werden müssen. Da die von diesen Bauteilen mitbestimmten Fugen ebenfalls im direkten Sichtbereich für den Kunden liegen, sind die Bauteiltoleranzen und eine abgestimmte thermische Längenausdehnung ebenfalls wichtige Anforderungen.

Im vertikalen dekorativen Außenhautbereich befinden sich die vorderen und hinteren Seitenwände und die vorderen und hinteren Türen. Während die Türstruktur hohen Strukturanforderungen genügen muss, haben die Seitenwände und die Türaußenhaut vor allem Verkleidungsfunktion. Daraus resultieren geringere Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen als im horizontalen Außenhautbereich. Diese Teile liegen im oberen vertikalen Sichtbereich und müssen hohe Oberflächenanforderungen erfüllen. In diesem Außenhautbereich wird zusätzlich gefordert, durch reversible elastische Verformung der Bauteile Bagatellschäden zu vermeiden.

Während diese Möglichkeit bei metallischen Werkstoffen kaum gegeben ist, kann bei der hohen Verformbarkeit und Schlagfestigkeit von Kunststoffen ein solcher Kundennutzen erschlossen werden.

Diese Eigenschaften bezüglich Stoßbelastungen z.B. durch Einkaufswagen, Steinschlag und andere Fahrzeuge nehmen im vertikalen funktionellen Außenhautbereich die wichtigste Position ein. Vorteilhafter als ein steifer und fester Stoßbereich ist zur Schadens- und Kostenvermeidung ein flexibler und schadenstoleranter. Da diese Bauteile beim Fahrzeugcrash in der Regel sehr viel Deformation erfahren, sind das Bruchverhalten und die Bauteilintegrität wichtig. Aber auch hier bestehen Mindestanforderungen an die Haptik und damit an die Beulsteifigkeit der Bauteile sowie gewisse Festigkeitsanforderungen aus Missbrauchslastfällen.

Die Aufteilung der Fahrzeugaußenhaut in diese drei Bereiche ist im Hinblick auf eine Auswertung der bestehenden Außenhaut-Anwendungen von faserverstärkten Kunststoffen vorteilhaft. Auch wird durch eine solche Einteilung in einer ersten Einschätzung schnell deutlich, welche Werkstoffe und Verfahren für welche Außenhautbauteile Potenziale bieten und welche von vornherein aufgrund der Hauptanforderungen ausscheiden.

## 2.2 Stand der Anwendungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Marktanalyse zum Thema „faserverstärkte Kunststoffe in der Fahrzeugaußenhaut“ durchgeführt. Die Analyse umfasst Material-Verfahrens-Kombinationen für faserverstärkte Kunststoffe, im weitesten Sinne von unverstärkten Thermoplasten bis zu Hochleistungsverbunden. Sie bezieht sich auf alle Fahrzeugtypen vom Großserienprodukt bis zum Concept Car als mögliche Vorstufe einer Serienanwendung.

Die in der Literatur, auf Automobilausstellungen oder Fachtagungen gefundenen Außenhautanwendungen teilen sich auf in folgende Fahrzeugsegmente:

- Personenkraftwagen (PKW) in Serienproduktion (Groß-, Mittel- und Kleinserien)
- Nutzfahrzeuge (NFZ) in Serienproduktion
- Sonderfahrzeuge, z.B. Supersportwagen oder Elektrofahrzeuge (Kleinst- und Kleinserien)
- Konzeptfahrzeuge (Concept Cars), Prototypen, Studien

Im PKW-Bereich können die Serienstückzahlen von Kleinstserien in Derivaten mit einigen Tausend Fahrzeugen pro Jahr bis hin zu Großserien mit mehreren Hunderttausend Fahrzeugen pro Jahr variieren. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit können hier nur auf die hohen Stückzahlen angepasste serientaugliche Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. In den letzten Jahrzehnten hat sich in der gesamten Automobilindustrie besonders in den sehr hohen Stückzahlbereichen Stahlblech für die Fahrzeugkarosserie und -außenhaut fest etabliert und durchgesetzt. Die Einführung neuer Verfahren und Werkstoffe ist aufgrund der hohen Stückzahlen und der bestehenden, auf Stahl abgestimmten Werkstrukturen mit hohen technologischen und wirtschaftlichen Risiken verbunden und deshalb erst bei nachgewiesener Technologiereife möglich.

Chancen bieten hier Nischenfahrzeuge in kleineren Stückzahlen, wie Derivate von Serienmodellen oder Sonderserien.

Für NFZ liegen die typischen Stückzahlen wesentlich niedriger, was den Einsatz alternativer Werkstoffe und Fertigungsverfahren erleichtert. Hier haben in den letzten Jahren Entwicklungen hin zu faserverstärkten Kunststoffen sowohl in der Außenhaut als auch in der Fahrzeugstruktur stattgefunden.

Fahrzeugserien mit sehr kleinen Stückzahlen, wie z.B. Sportwagen oder Elektrofahrzeuge, bieten sich aus Investitionsgründen für die Realisierung in faserverstärkten Kunststoffen an. Anstelle von hohem Automatisierungsgrad und hoher Ausbringung des Fertigungsverfahrens für niedrige Herstellkosten verschiebt sich hier die Wirtschaftlichkeitsanforderung zu niedrigem Invest und hohem manuellen Arbeitsanteil. Zudem kann mit den faserverstärkten Kunststoffen, insbesondere mit CFK, die Forderung nach möglichst geringem Gewicht für ein hohes Leistungs-Gewichts-Verhältnis (Sportwagen) oder für niedrigen Energiebedarf (Elektrofahrzeuge) erfüllt werden (siehe Abbildung 2.3).



McLaren F1



Corbin Motors Sparrow

**Abbildung 2.3:** Beispiele für Sportwagen und Elektrofahrzeuge aus FVK

Da Konzeptfahrzeuge und Studien meist an die Grenzen hinsichtlich Leistung oder Verbrauch, sowie Design und innovativer Technologien gehen, werden hier sehr häufig FVK eingesetzt. Eine Motivation ist die kostengünstige und schnelle Darstellbarkeit von Einzelstücken für Präsentationsfahrzeuge („Show Cars“). Dennoch gibt es hier Konzepte, welche die Machbarkeit hinsichtlich Funktion, Fertigung und Wirtschaftlichkeit zeigen und Perspektiven für mögliche Fahrzeugmodelle und Technologien geben sollen. Beispiele hierfür sind die Konzeptfahrzeuge der drei großen Automobilhersteller DaimlerChrysler, General Motors und Ford zur gemeinsamen Entwicklung im Rahmen des PNGV-Programms („Partnership for a New Generation of Vehicles“). In dieser staatlich initiierten und geförderten Entwicklung für eine neue Fahrzeuggeneration mit stark reduziertem Energieverbrauch wurden in den USA zahlreiche Entwicklungen in Konzeptfahrzeugen umgesetzt. In früheren Stadien wurden die Vorgängerfahrzeuge Impact und EV1 von General Motors, Intrepid ESX und ESX2 von DaimlerChrysler sowie Synergy 2010 und P2000 von Ford präsentiert.

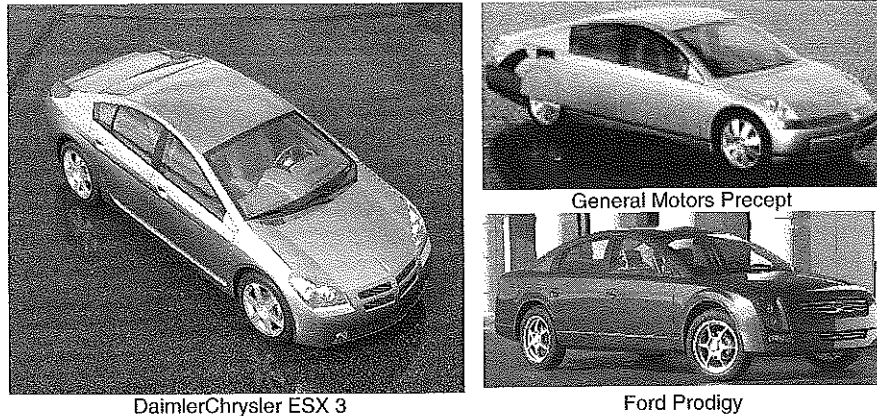


Abbildung 2.4: Prototypen aus dem PNGV-Projekt im Jahr 2000

Als Stufe 2 des PNGV-Programms stellten die Automobilhersteller im Jahr 2000 die Konzeptfahrzeuge GM Precept, DaimlerChrysler ESX3 und Ford Prodigy vor (siehe Abbildung 2.4). Ein weiteres Beispiel für eine Machbarkeitsstudie und seriennahe Umsetzung von FVK im Automobilbau ist der Z22 der BMW Technik GmbH. Hier wurden zwei Großbauteile der Fahrgastzelle, nämlich der Seitenrahmen und die Bodengruppe, im RTM-Verfahren aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt.

### 2.2.1 Beispielanwendungen FVK in der Außenhaut

In der Recherche wurden über 100 Fahrzeuge mit Einzelkomponenten oder auch mit kompletter Außenhaut aus faserverstärkten Kunststoffen erfasst. Um trotz des großen Umfangs der Datensammlung einen Einblick in die am Markt vorhandenen Anwendungen zu geben, sind in Anhang B für jede Verfahrensgruppe einige Beispiele in Tabellenform angegeben. Dabei sind die Material-Verfahrens-Kombinationen gemäß Tabelle 2.1 in Gruppen zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Gruppierung der einzelnen Fertigungsverfahren für FVK

	Gruppe	Verfahren
A	Thermoplaste (unverstärkt und verstärkt)	UTP, KFT, LFT, GMT
B	Moulding Compounds	ZMC, BMC, SMC
C	Reaction Injection Moulding	RIM, RRIM, SRIM
D	Harzinjektionsverfahren	RTM und verwandte Verfahren (VARI...)
E	Sonderverfahren	z.B. Handlaminieren

Da in den folgenden Kapiteln das Resin Transfer Moulding-Verfahren als zielführend zur Verwirklichung der Zielsetzung dieser Arbeit ausgewählt wird, ist nachfolgend nur der Stand der Anwendungen für die Harzinjektionsverfahren dargestellt.

Bis auf einige wenige Ausnahmen konnten sich die Harzinjektionsverfahren noch nicht in großen Stückzahlen durchsetzen. Anwendungen sind hauptsächlich Sport- und Sonderfahrzeuge in sehr kleinen bis mittleren Stückzahlen. Gründe hierfür sind die lange Taktzeit des Injizierens und Aushärtens im Werkzeug sowie die bisher noch nicht ausreichende Automatisierung. Die Handhabung der Verstärkungshalbzeuge und die Nacharbeit am Bauteil erforderten bisher intensiven manuellen Arbeitseinsatz. Überwiegend aus Kostengründen kommen in fast allen Anwendungen am Markt Glasfasermatten als Verstärkung und Polyesterharze als Matrixmaterial zum Einsatz. Damit sind nicht die hohen mechanischen Eigenschaften erreichbar, die mit Hochleistungswerkstoffen im RTM-Verfahren erzielt werden können. Bei den Werkstoffen und vor allem dem RTM-Verfahren hat es in den letzten Jahren Entwicklungen gegeben, die von ersten Umsetzungen in Kleinstserien mit zweifelhafter Qualität hin zur automatisierten Fertigung in Mittelserien für qualitativ hochwertige Fahrzeuge geführt haben.

Beim BMW Z1 wurden schon 1986 die Front-, Heck-, und Verdeckklappen im RTM-Verfahren für etwa 1.200 Fahrzeuge pro Jahr hergestellt. Alle Klappen wurden in Sandwich-Bauweise mit PUR-Schaumkern, Glasmattenverstärkung und EP-Matrix ausgeführt. Zum Erreichen einer ausreichenden Oberflächenqualität war allerdings eine aufwendige Nacharbeit nötig. Seit 1990 wird in Nordamerika ein Großteil der Außenhaut des Sportwagens Dodge Viper im RTM-Verfahren mit Glasmatten gefertigt (siehe Abbildung 2.5). Die Verwendung von Gelcoats, Füllern und zudem Handnacharbeit ermöglichen hier eine Verbesserung der Oberflächenqualität. Lotus führte 1990 den Sportwagen Elan mit einer kompletten Fahrzeugaußenhaut in GFK ein, die im VARI-Verfahren hergestellt war. Dieselbe Technologie kam auch beim Modell Elise 1996 mit bis zu 3.000 Fahrzeugen pro Jahr zum Einsatz, wird für den Elise 2000 eingesetzt und ist auch für den 340R und den Exige geplant. Die Verwendung glasmattenverstärkter Polyester im RTM-Verfahren bei Heckspoilern ist seit Mitte der 90er zunehmend zu betrachten, z.B. bei den Citroen Modellen BX, ZX und XM sowie dem Ford Fiesta und Focus. Porsche setzt das RTM-Verfahren mit glasmattenverstärktem EP-Harz beim Heckspoilerdeckel und Heckflügel des 911 Turbo in den Modellen von 1995 und 1999 ein. Besonders bei Heckspoilern werden schon beachtliche Stückzahlen erreicht. Als Beispiel hierfür kann der Ford Fiesta Spoiler mit einem Drei-Kavitäten-Werkzeug und über 850 Einheiten pro Tag dienen.

Das RTM-Verfahren findet zunehmend Verwendung in der Außenhaut für Sportwagen mit geringen bis mittleren Stückzahlen wie dem Aston Martin DB7 (siehe Abbildung 2.5), dem Jaguar XJ220 und dem Opel Speedster. Hierbei ist neben der Wirtschaftlichkeit vor allem der Leichtbau für die Sportlichkeit der Fahrzeuge, ausgedrückt im Leistungsgewicht, entscheidend.



Dodge Viper

Aston Martin DB7

**Abbildung 2.5:** Zwei Beispiele für Fahrzeuge mit RTM-Außenhautbauteilen

Eine Entwicklung des Verfahrens hin zu großen Anbauteilen und multifunktionalen Großbauteilen ist im NFZ-Bereich zu beobachten. So werden mittlerweile zahlreiche Hochdächer, Dachspoiler, Windabweiser, Seitenverkleidungen und große Motorhauben für LKW im RTM-Verfahren aus glasmatteverstärktem Polyester hergestellt. Diese Anwendungen finden sich bei verschiedensten LKW-Herstellern wie z.B. MAN, Iveco, DaimlerChrysler, Ford, Leyland, Volvo und Mack. Auch große Strukturteile wie Schlafkabinen und ganze Fahrerhäuser sind mittlerweile in Produktion. Als besonderes Beispiel hierzu können die DaimlerChrysler Unimog Modelle UX-1 Citymog und die Nachfolger UX300 bis UX500 dienen (siehe Abbildung 2.6). Hier kommen als große Ausnahme zu den anderen Anwendungen auch Verstärkungshalbzeuge aus Kohlenstofffaser zum Einsatz.



DaimlerChrysler UX-1 Citymog



DaimlerChrysler UX-400

**Abbildung 2.6:** Beispiele für Nutzfahrzeuge mit RTM-Außenhautbauteilen

Während im NFZ-Bereich aufgrund der niedrigeren Anforderungen die Oberflächenqualität oft durch Gelcoat-Schichten oder dicke Füllerschichten erreicht werden kann, ist dies bisher im PKW-Bereich nur durch manuelle Nacharbeit in Form von flächigem Schleifen möglich. Zudem finden sich noch keine Hochleistungsverstärkungen in Anwendungen mit Class-A-Oberflächenanspruch. Bisher kommen nur glasmatteverstärkte Polyester- oder Epoxidharze zum Einsatz.

## 2.2.2 Folgerungen aus dem Stand der Anwendungen

Es lassen sich aus der Vielzahl der verschiedenen Außenhautanwendungen von faserverstärkten Kunststoffen am Markt folgende Schlüsse ziehen: (Diese Aussagen beziehen sich nur auf in Wagenfarbe lackierte Außenhautbauteile.)

- Mit Abstand am weitesten verbreitet und in den größten Stückzahlen vorhanden sind die unverstärkten Thermoplaste, die im Spritzguss verarbeitet werden. Hauptanwendungen sind Stoßfänger und Schwellerverkleidungen, mit Tendenzen hin zu Seitenwänden. Allerdings reichen trotz der hohen erreichbaren Oberflächenqualität die mechanischen Eigenschaften unverstärkter Thermoplaste nicht für eine Verwendung in Bauteilen mit hoher geforderter Steifigkeit wie Klappen.
- Lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplaste (GMT, LFT...) spielen in der Außenhaut in Serie keine erkennbare Rolle.
- SMC ist über die gesamte Fahrzeugaußenhaut in zahlreichen Anwendungen im horizontalen und vertikalen dekorativen Außenhautbereich vertreten. Vor allem auf dem nordamerikanischen Markt sind Hunderte von Anwendungen im PKW- und NFZ-Bereich zu vermerken. SMC kann aufgrund der Faserverstärkung die strukturellen Anforderungen für Klappen, Dächer und Türen mit ausreichender Wandstärke erfüllen. Im funktionalen Bereich stellt die höhere Sprödigkeit und somit geringere Verformbarkeit einen Nachteil gegenüber den unverstärkten Thermoplasten dar.
- Die Verfahren RIM und RRIM sind in Außenhautanwendungen im vertikalen oder funktionalen Außenhautbereich schwach vertreten. Die Entwicklungen hin zu außenhautfähigen Materialien zeigen in zunehmenden Anwendungen erste Resultate.
- Die Anwendungen für RTM sind, aufgrund der guten erreichbaren Bauteileigenschaften, die steifen dekorativen Außenhautbauteile. So sind am Markt insbesondere Klappen, Dächer und Seitenwände zu finden. Im funktionalen Bereich kann die erreichbare Bauteilsteifigkeit nicht gegen die geforderte Schadenstoleranz konkurrieren. Neben einem starken Markt im NFZ-Bereich findet RTM im PKW-Bereich hauptsächlich bei Sportwagen und Sonderfahrzeugen mit relativ niedrigen Stückzahlen Anwendung.
- Die meisten Anwendungen für RTM am Markt werden mit Glasfaserverstärkung und Polyestermatrix hergestellt, gefolgt von glasfaserverstärkten EP-Harzen, Acrylatharzen oder Vinylesterharzen. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden vereinzelt in Prototypen und zumeist in Hochleistungs-Fahrzeugen im RTM-Verfahren eingesetzt. In Serienanwendungen mit mittleren und größeren Stückzahlen finden sich ausschließlich glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit Textilglasmatte.
- Die meisten Anwendungen am Markt mit dem Anspruch einer Class-A-Oberflächenqualität sind heute in unverstärkten Thermoplasten ausgeführt, gefolgt von SMC. Erst weit danach, mit weniger Anwendungen bei gleichzeitig geringeren Stückzahlen, folgt RTM für Nischenfahrzeuge.
- Die typischen Stückzahlbereiche, die so als Anwendungen am Markt vorliegen, sind für einige Verfahren in Tabelle 2.2 angegeben.

**Tabelle 2.2:** Typische Stückzahlen aus der Marktanalyse

Verfahrensfamilie	Typische Stückzahlen pro Jahr
Thermoplaste	30.000 – 200.000 (>200.000)
SMC, BMC	30.000 – 150.000 (BMC – 200.000)
RIM, RRIM, SRIM	3.000 – 65.000
RTM	2.000 – 15.000

### 2.3 Fertigungsverfahren für Außenhautbauteile aus FVK

Wie aus der Marktanalyse zu Außenhautanwendungen in faserverstärkten Kunststoffen ersichtlich ist, kommen zahlreiche Verfahren in Kombination mit verschiedenen Werkstoffen zur Fertigung von Außenhautbauteilen in Frage. Für eine weitere Betrachtung lag das Hauptaugenmerk auf den Verfahren, mit welchen eine Serienfertigung großflächiger Schalen mit hoher Oberflächenqualität denkbar ist. Aus diesem Grunde wurden Verfahren wie das Handlaminieren mit Autoklavtechnik, das Wickelverfahren und das Pultrusionsverfahren nicht berücksichtigt. Hier sei auf die Verfahrensbewertungen in der Fachliteratur verwiesen, die anwendungsunabhängig verschiedene Verfahren vergleichen (vgl. [5], [33], [87] und [38]).

Die Hauptverfahren und deren zahlreiche Varianten weisen eine enorme Vielzahl von Verfahrensbezeichnungen verschiedener Firmen auf. Zur besseren Übersicht ist in Anhang C ein Abkürzungsverzeichnis für auf dem Markt und in der Literatur zu findende Verfahrensbezeichnungen gegeben.

#### 2.3.1 Betrachtete Fertigungsverfahren

Zur Bewertung der Verfahren hinsichtlich der Fertigung von Außenhautbauteilen wurde eine Informationsmatrix mit den denkbaren Verfahren erstellt. Aufgrund des Umfangs ist nur ein kleiner Ausschnitt dieser Verfahrensübersicht in Anhang D beispielhaft für das S-RIM und das RTM-Verfahren gezeigt. Diese Sammlung von Informationen soll, im Gegensatz zu einer Wertung, als Basis für eine Betrachtung der Verfahren nach detaillierteren Anforderungen dienen.

Die Matrix umfasst die Verfahren der Spritzgusstechnik, der Injektionstechnik und der Presstechnik, wobei durchaus auch Grenz- und Mischfälle auftreten. Die Spritzgussverfahren, englisch „Injection Moulding (IM)“, transferieren den Werkstoff unter hohen Drücken ins geschlossene Werkzeug zur Aushärtung oder Erstarrung. Dabei kann der Werkstoff unverstärkt oder z.B. mit Kurzfasern oder diversen Füllstoffen verstärkt sein, unter Berücksichtigung einer gewünschten Fließfähigkeit. Der Werkstoff füllt die Werkzeugkavität durch Fließen und formt so das Bauteil aus. Bei den Injektionsverfahren, englisch „Liquid Composite Moulding (LCM)“, werden zunächst trockene Verstärkungsfasern im Werkzeug mit dem Matrixmaterial getränkt. Bei dem Injektionsschritt füllt der Matrixwerkstoff die Werkzeugkavität durch Fließen und formt so die Bauteilgeometrie. Wird das Bauteil durch einen Pressvorgang ausgeformt, so handelt es

sich um ein Pressverfahren, englisch „Compression Composite Moulding (CCM)“. Hierbei werden die faserverstärkten Halbzeuge ins offene Werkzeug eingebracht. Die Bauteilform wird beim Schließen des Werkzeuges durch Fließpressen oder Stempelumformung erzeugt.

Um einen Vergleich zu vereinfachen, wurden die ausgewählten Verfahren nach Ähnlichkeit angeordnet (siehe Tabelle 2.3).

**Tabelle 2.3:** Fertigungsverfahren für Außenhautbauteile in FKV

Gruppe	Verfahren
Spritzgießen, Injection Moulding (IM)	1. Unverstärkter Thermoplast (TP)
	2. Kurzfaserverstärkter Thermoplast (KFT)
	3. Reaction Injection Moulding (RIM)
	4. Reinforced RIM (RRIM)
Injektionsverfahren, Liquid Composite Moulding (LCM)	5. Structural RIM (S-RIM)
	6. Resin Transfer Moulding (RTM), Advanced RTM (ARTM), Injection Compression Moulding (ICM)
	7. Resin Film Infusion (RFI), Diaphragmaverfahren
Pressverfahren, Compression Composite Moulding (CCM)	8. Advanced Moulding Process (AMP), Nasspressen
	9. Bulk Moulding Compound (BMC) (Spritzguss oder Pressen)
	10. Sheet Moulding Compound (SMC), Low Profile SMC (LP-SMC) Low Density SMC (LD-SMC)
	11. Kohlenstoffaser-SMC, Advanced SMC (CF-SMC)
	12. Woven Moulding Compound (WMC), Preform Compound (PFC)
	13. Organoblech-Thermoformen (OBT), Matched Metal Moulding
	14. Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)
	15. Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT)



### 2.3.2 Verfahrensvergleich

Anhand einiger Einzelkriterien aus der Verfahrensmatrix wurden die Verfahrens- und Materialkombinationen untereinander verglichen. Dabei erschienen vor allem die folgenden Merkmale für eine erste Betrachtung interessant:

- mechanische Eigenschaften (hier E-Modul)
- Stückzahlen pro Jahr (Serientauglichkeit)
- Bauteilkomplexität (Gestaltungsfreiheit, Integrationsmöglichkeiten)
- Oberflächenqualität (Einsatzfähigkeit in der Fahrzeugaußenhaut)

Bei diesem Vergleich können aufgrund der Bandbreite von eingesetzten Materialien in jedem Verfahren immer mehr oder weniger große Bereiche zu den Merkmalen angegeben werden. Diese sind in den Diagrammen als Ovale dargestellt und mit den Verfahrensabkürzungen aus Tabelle 2.3 versehen.

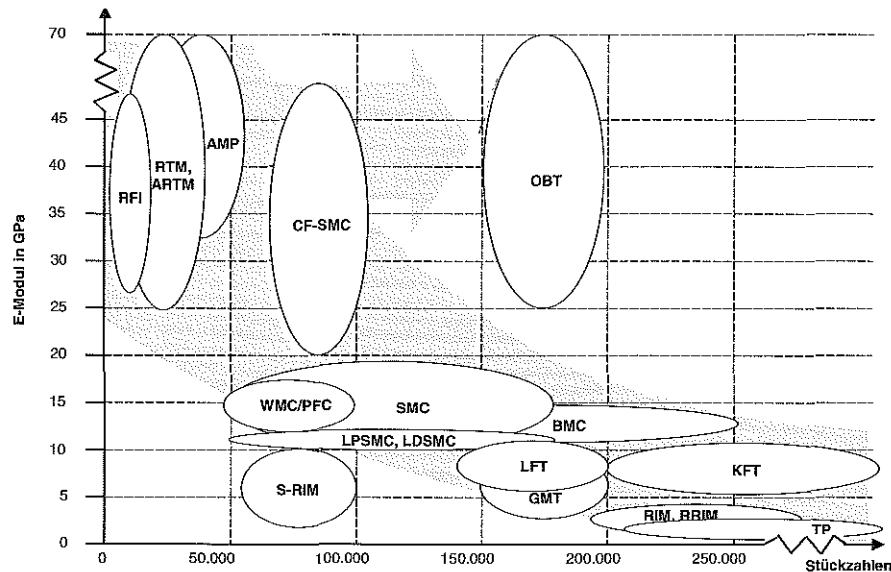


Abbildung 2.7: Verfahrensvergleich – Mechanische Eigenschaften über Stückzahlen

In Abbildung 2.7 wird deutlich, dass sich zur Zeit nur solche Verfahren im Großserieneinsatz befinden, welche eine geringe Bauteilsteifigkeit ermöglichen. Dieser Zusammenhang entsteht durch die Rolle der Verstärkungsfasern im Fertigungsprozess, die zusätzliche Arbeitsschritte (z.B. beim Preformen) mit derzeit hohem manuellen Aufwand mit sich bringen. Deshalb sind sowohl Zykluszeiten als auch Materialkosten, insgesamt also die Herstellungskosten für diese Bauteile wesentlich höher, was eine Anwendung in Großserien unwirtschaftlich macht. Aus-

nahme in diesem Diagramm ist das Organoblech-Thermoformen, welches theoretisch in großen Stückzahlen umsetzbar ist, aber noch nicht in Serienproduktion vorhanden ist.

Die Ziele für eine Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren für CFK für einen Serieneinsatz sind in dieser Abbildung als Pfeil dargestellt. Die dazu notwendige Zykluszeitreduzierung muss durch hochreaktive Matrixsysteme und höhere Automatisierung der Prozessschritte erfolgen. Zudem ist eine Verminderung der Materialkosten erforderlich, um Anwendungen mit höheren Stückzahlen wirtschaftlich realisieren zu können.

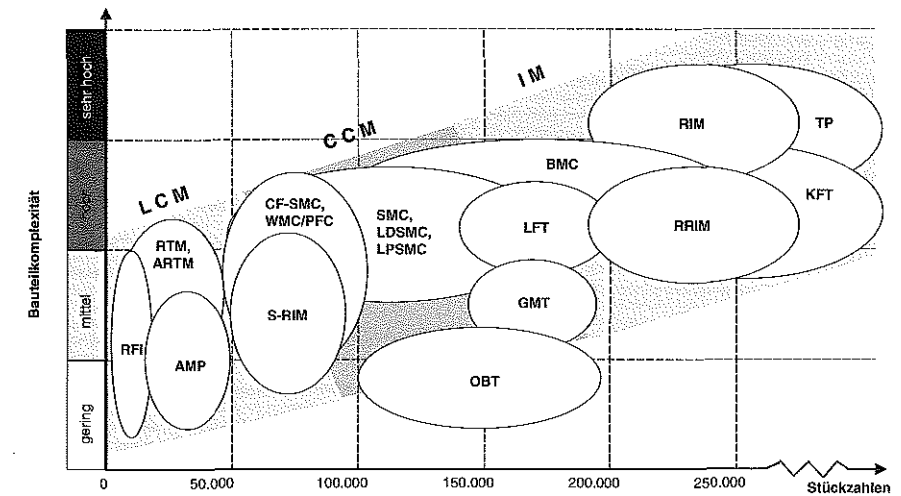


Abbildung 2.8: Verfahrensvergleich – Bauteilkomplexität über Stückzahlen

Im Vergleich der Verfahren nach der möglichen Bauteilkomplexität über den typischen Stückzahlen zeigen sich die ähnlichen Eigenschaften innerhalb der Verfahrensfamilien (siehe Abbildung 2.8). Spritzgussverfahren (IM) können durch Füllen der Form mit flüssigem Matrixmaterial sehr komplexe Geometrien in sehr kurzer Zykluszeit erzeugen. Eine zunehmende Verstärkung mit Kurz- oder Langfasern bedeutet hier Einschränkungen in der Fließfähigkeit und somit geringere Bauteilkomplexität und auch längere Zyklen. Die Pressverfahren und Fließpressverfahren (CCM), zumeist mit Kurz- oder Langfasern, nehmen eine Mittelstellung ein. Die Verwendung von Endlosfaserverstärkung in den Injektionsverfahren (LCM), z.B. in Form von Matten, Geweben oder Gelegen, schränkt in der Bauteilkomplexität ein, da die flächigen Halbzeuge in Bauteilgeometrie gebracht werden müssen.

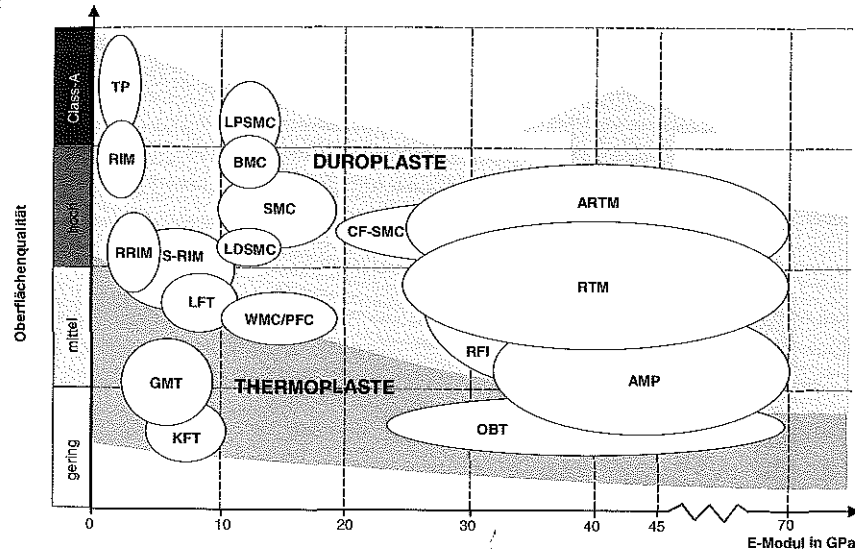


Abbildung 2.9: Verfahrensvergleich – Oberflächenqualität über mechanische Eigenschaften

In Abbildung 2.9 zeigt sich, dass Werkstoff-Verfahrens-Kombinationen ohne Fasern oder mit geringem Anteil an Kurzfasern die höchste Oberflächenqualität erreichen. Je mehr Faserverstärkung eingesetzt wird und je regelmäßiger sie vorliegt, desto inhomogener wird der Werkstoff und desto niedriger die Oberflächenqualität. Bei den verstärkten Werkstoffen zeigt sich eine Schichtung nach Matrixwerkstoffen. Thermoplaste haben insgesamt eine schlechtere Oberflächenqualität als Duroplaste, was durch den größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten und die höheren Verarbeitungstemperaturen verursacht wird. Die Duroplaste bieten also für die Entwicklung von Verfahrens-Werkstoff-Kombinationen mit hohen mechanischen Eigenschaften und gleichzeitig sehr hoher Oberflächenqualität ein größeres Potenzial als die Thermoplaste. Bereits vorhandene Beispiele für die Verbesserung der Oberflächenqualität bei gleichbleibend hohen mechanischen Kennwerten sind schrumpfoptimierte Systeme (LPSMC) und schrumpfmindernde Prozessschritte (ARTM).

### 2.3.3 Eingrenzung auf das RTM-Verfahren

Der im Automobilbau oft gebrauchte Begriff der „Gewichtsspirale“ verdeutlicht den Bedarf an gewichtsmindernden Maßnahmen. Um für Bauteile mit strukturellen Anforderungen Leichtbau realisieren zu können, sind gute spezifische Werkstoffeigenschaften erforderlich, also hohe Steifigkeit und hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht. Diese Leichtbauanforderungen werden in der Familie der FVK durch die „Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe“ (englisch „Advanced Composites“) am besten erfüllt. Sie zeichnen sich durch eine Endlos-Faserverstär-

kung (Gewebe, Gelege, Bänder...) mit Kohlenstofffasern aus, wodurch sehr hohe spezifische Bauteileigenschaften erzielt werden können.

Im Verfahrensvergleich zeigt sich, dass bei der Auswahl von Werkstoff-Verfahrens-Kombinationen immer Kompromisse zwischen einigen Merkmalen geschlossen werden müssen. Vor dem Hintergrund der massiven Leichtbauanforderungen zeigen die Hochleistungs-Verbundwerkstoffe das größte Potenzial für Bauteile mit zusätzlichen strukturellen Anforderungen. Die kurzfaserverstärkten Werkstoffe wie z.B. BMC, SMC und KFT zeigen ein geringeres Leichtbaupotenzial, sind dafür aber in völlig anderen Stückzahlen einsetzbar. Zur Herstellung von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen kommen verschiedene Verfahren und Matrixmaterialien in Frage. In der Verfahrensbetrachtung fällt in Abbildung 2.9 auf, dass die Thermoplaste in der erreichbaren Oberflächenqualität deutlich unter den Duroplasten liegen. Für die Herstellung von endlosfaserverstärkten Duroplasten bieten sich für flächige Bauteile die Injektionsverfahren wie RTM, ARTM, RFI und SCRIMP an. Innerhalb dieser Verfahrensgruppe bietet das RTM-Verfahren Vorteile hinsichtlich Oberflächenqualität, geringen Bauteiltoleranzen und kontrollierten Bauteildicken.

Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit das RTM-Verfahren als zielführend zur weiteren Entwicklung hin zu einem Serieneinsatz von Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden in der Fahrzeugaußenhaut ausgewählt. Dabei liegen die größten Herausforderungen für dieses Verfahren, wie in den Diagrammen gezeigt, in der Erhöhung der möglichen Stückzahlen für eine Serientauglichkeit und der Verbesserung der Oberflächenqualität hin zur Class-A-Tauglichkeit.

## 2.4 Oberflächenqualität automobiler Außenhautbauteile

### 2.4.1 Der Begriff der „Class-A-Oberflächenqualität“

Das äußere Erscheinungsbild eines Automobils, insbesondere die Oberflächenqualität und Lackierung der Fahrzeugaußenhaut, trägt entscheidend zur Wertschätzung durch den Kunden bei. Im Automobilssektor haben sich für Außenhautbauteile Technologien zur Biechumformung und anschließenden Lackierung entwickelt, die hochwertige Oberflächen mit verschiedenen Lackeffekten erzeugen können. Vor diesem Hintergrund hat sich der Begriff der „Class-A-Oberflächenqualität“ gebildet, der als Maßstab für einen Qualitätsanspruch der Automobilindustrie an die Oberflächen von Außenhautbauteilen gilt.

Eine exakte Definition der Class-A-Oberflächenqualität fällt aus mehreren Gründen schwer (siehe [112]). Es gibt am Markt unterschiedliche Qualitätsanforderungen und somit unterschiedliche Maßstäbe je nach

- Märkten/Kontinenten (Vergleich EU, USA, Asien, oder innerhalb EU)
- Marken/Firmenprofil (Qualitätsanspruch, Unternehmensrichtlinien)
- Zielfahrzeugen (Typensegment, PKW/NFZ, Stückzahlen, Exotenfahrzeuge)
- Bauteilen (Anordnung am Fahrzeug, horizontal/vertikal, Sichtbarkeit für den Kunden)
- Messverfahren und Beurteilungsmethode

Trotz all dieser Unterschiede gilt im Allgemeinen:

Die Oberfläche eines in Wagenfarbe lackierten Außenhautbauteils erfüllt die Class-A-Qualitätsanforderung dann, wenn seine Oberflächenercheinung der eines angrenzenden lackierten Bauteils aus konventionellem Stahlblech gleicht.

Als weiteres Hauptmerkmal der Class-A-Oberflächenqualität gilt:

Oberflächenmessverfahren mit quantitativ erfassbaren Größen können wertvolle Hilfswerkzeuge zur Oberflächenbeurteilung sein. Geforderte Grenzwerte für diese Messverfahren stellen Muss-Bedingungen dar. Letzte Instanz zur Beurteilung der Class-A-Qualität ist derzeit der menschliche Betrachter, der die Oberfläche immer individuell und subjektiv bewertet.

Aufgrund dieser Problematik, die auch für Bauteile aus metallischen Blechen besteht, werden zunehmend Oberflächenmessverfahren und -kenngrößen entwickelt und eingesetzt, die eine bessere Erfassung der Oberflächenmerkmale ermöglichen [100].

### 2.4.2 Oberflächenklassifizierung

Grundlage zur Bewertung der Oberflächenqualität in dieser Arbeit bilden beispielhaft die firmeninternen BMW-Standards für lackierte Oberflächen. Die BMW-Norm „Oberflächenklassifizierung für lackierte Kraftfahrzeuge“ [11] definiert und beschreibt firmenintern Begriffe, auftretende Oberflächenfehler, Mess- und Beurteilungsverfahren, Abnahmewerte und Bewertungszonen für die Außenhaut der einzelnen Fahrzeugmodelle.

Für die Bewertung ist die Oberfläche des Gesamtfahrzeugs in Bewertungszonen von A (unmittelbar sichtbar) bis E (nach Montage verdeckt) eingeteilt (siehe Abbildung 2.10). Diese Einteilung soll der unterschiedlichen Sichtbarkeit und Gewichtung von Fehlern am Gesamtfahrzeug gerecht werden.

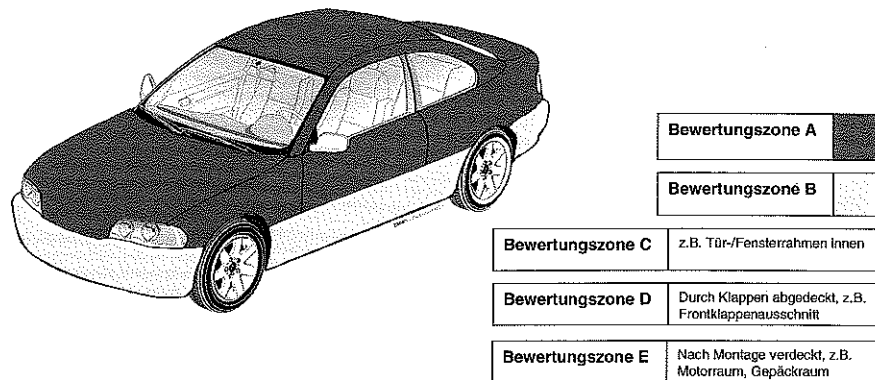


Abbildung 2.10: Bewertungszonen des Gesamtfahrzeugs am Beispiel des BMW 3er Modells

Eine Auflistung der verschiedenen Arten von Oberflächenfehlern ist in Tabelle 2.4 gegeben. Weiterhin werden in zusätzlichen Normen und Prüfvorschriften die anzuwendenden Prüfverfahren und deren Grenzwerte festgelegt (siehe [12] und [13]). Trotz dieser umfangreichen Auflistung und Beschreibung zeigt sich, dass diese Norm zur Oberflächenklassifizierung auf die Problemfelder der in der Automobilindustrie dominierenden Werkstoffe zugeschnitten ist. Es werden überwiegend Fehlerarten genannt, deren Ursachen vor allem im Lackierprozess (Lackläufer, Lackkocher, matte Lackierung, Magerlackierung...) und zum Teil im Umformvorgang von Stahlblech (Dellen, Beulen) liegen. Die für CFK-Bauteile typischen Oberflächenfehler (siehe Kapitel 2.4.3) werden als neuartige Fehlerarten ungenügend oder nur teilweise erfasst.

Tabelle 2.4: Benennung von Oberflächenfehlern nach BMW Group Standard GS 97003-1 [11]

Nr.	Fehlerarten	Nr.	Fehlerarten
1	Kratzer (einzeln)	17	Schleifflecken
2	Dellen	18	matte Lackierung
3	Beulen	19	Berührungen
4	Welligkeit	20	fehlende Lackierung
5	Verschmutzung	21	PVC-Verschmierung
6	Schleifriefen, Schleifstellen	22	Farbtonunterschiede
7	Einzugstellen	23	Abdeckkanten
8	Abdichtungs-, Klebereste	24	Wolkenbildung (metallic)
9	Versiegelung: Poren, Blasen	25	Wasserflecken
10	abgeplatzter Lack, Beschädigungen	26	Anätzungen
11	Lackablösungen	27	Abquellungen
12	Lackläufer		<b>zählbare Fehler</b>
13	Orangenhaut / Lackstruktur	28	Einschlüsse
14	Magerlackierung	29	Krater, Poren
15	Farnebel	30	Lackkocher
16	Polierflecken / Hologramme	31	Bläschenbildung

### 2.4.3 Typische Oberflächenfehler bei CFK

Um hochwertige Oberflächen mit FVK realisieren zu können, gibt es für die verschiedenen Werkstoff-Verfahrens-Kombinationen zahlreiche Untersuchungen und Ansätze (siehe z.B. [91], [32], [86] und [10]). Aus Kundensicht und zur „normierten“ Betrachtung verschiedener Werkstoffe werden immer die in Wagenfarbe lackierten Bauteiloberflächen beurteilt. Somit schließt die Beurteilung auch immer die Fehler mit ein, die ihre Ursachen in der Lackierung bzw. der Abstimmung der Lackierung auf das Substrat haben.

In Tabelle 2.5 sind die typischen Oberflächenfehler und deren ursächliche Zuordnung für lackierte Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen angegeben. Dabei werden diejenigen schwerwiegenden Fehler nicht berücksichtigt, die schon bei Nicht-Sichtteilen aus FVK zu

Ausschuss führen würden, wie Trockenstellen oder eine Verschiebung der Verstärkungsmaterialien. Viele Oberflächendefekte, wie z.B. die zählbaren Fehler aus Tabelle 2.4 oder die Fehlergruppen A und B aus Tabelle 2.5, sind von ihrer flächigen Ausdehnung klar begrenzt oder sogar punktförmig und deshalb meist eindeutig erkennbar. Fehler ohne eine klare flächige Begrenzung, wie die Fehlergruppen C, D, E und F, sind wesentlich schwerer zu erfassen. Das Faserdurchzeichnen z.B. ist flächig nicht klar begrenzt und bewirkt Störungen im Höhenprofil von zum Teil nur wenigen Mikrometern.

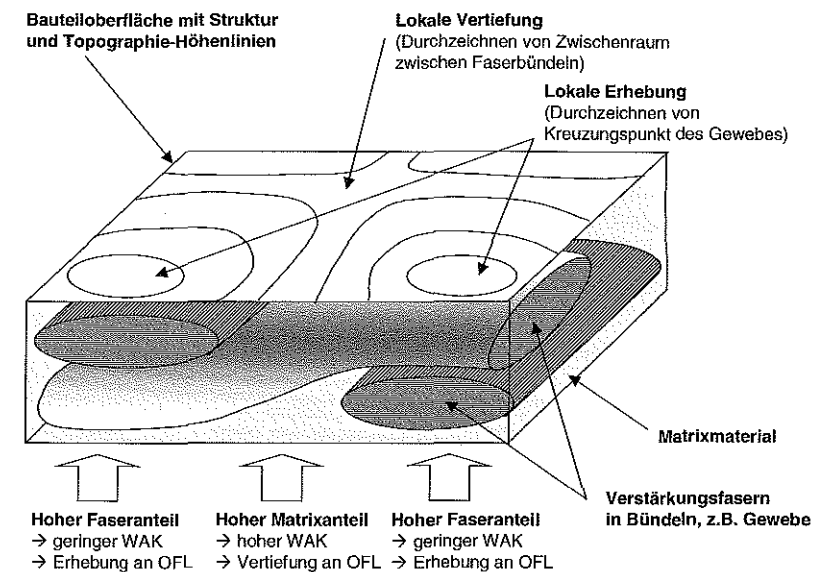
**Tabelle 2.5:** Typische Fehler an Oberflächen faserverstärkter Kunststoffbauteile

	Oberflächenfehler	Ursachen
A	Poren, Lunker, Gaseinschlüsse und deren Effekt im Bauteil und vor allem an der lackierten Oberfläche („pinholes“, Bläschen...)	Materialien, Fertigungsprozess
B	Schrumpfbäume, Freies Schrumpfen (Ablösen von WZ-Oberfläche beim Schrumpfen, „sinkmarks“)	Materialien, Fertigungsprozess
C	Faserdurchzeichnen (Verstärkungsstruktur, „fiber read-out“, „fiber marking“)	Materialien, Fertigungsprozess
D	Durchzeichnen von Unterstruktur (Verklebungen, Dickensprünge, Sandwichkerne...)	Bauteilgestaltung, -konstruktion, Materialien, Fertigungsprozess
E	Rauhigkeit, Glanz	Lackierung, Materialien, Fertigungsprozess
F	Fehler mit Ursachen in der Lackierung oder Abstimmung Lack/Substrat (Lackhaftung, Verlaufsstörung, Farbabstimmung, Staubeinschlüsse, Lackkocher...)	Lackierung

Die Oberflächenfehler, die insbesondere bei den Harzinjektionsverfahren wie RTM und S-RIM auftreten, sind in [32] beschrieben. Da das Hauptproblem bei den endlosfaserverstärkten Kunststoffbauteilen das Durchzeichnen der regelmäßigen Verstärkungsstrukturen ist, wird dieses im Folgenden detailliert beschrieben.

Faserverstärkte Kunststoffe haben aufgrund der beiden Hauptbestandteile Verstärkungsfasern und Matrixmaterial einen inhomogenen Aufbau (siehe Abbildung 2.11). Bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen mit duromerer Matrix in einem Injektionsverfahren sind meist hohe Prozesstemperaturen zur Minimierung der Zykluszeit notwendig. Bei der Reaktion und Vernetzung des Matrixsystems erfährt dieses eine Dichtesteigerung, die als Reaktionsschwindung bezeichnet wird. Nach dem Entformen findet bei der Abkühlung des Bauteils auf Raumtemperatur die sogenannte thermische Schwindung statt, die abhängig von den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Einzelbestandteile des Verbundmaterials ist. Die Wärmeausdehnung ist für die eingesetzten Fasern sehr gering (C-Fasern quer mit  $\alpha_{th} \approx 10 \times 10^{-6} 1/K$ , längs mit  $\alpha_{th} \approx -1 \times 10^{-6} 1/K$ ), für duromere Matrixsysteme hoch (z.B. Epoxidharzsysteme mit  $\alpha_{th} \approx 11 \dots 35 \times 10^{-6} 1/K$ ) und für thermoplastische Matrixwerkstoffe sehr hoch (z.B. PA6 mit  $\alpha_{th} \approx 80 \times 10^{-6} 1/K$ , siehe [29] und [109]).

In beiden Fällen, bei Reaktionsschwindung und thermischer Schwindung, führt der inhomogene Aufbau des Faserverbundwerkstoffs zur Ausbildung von Bereichen, die in Dickenrichtung eine unterschiedliche Längenänderung erfahren. Die Bereiche mit einem hohen Faseranteil haben über die Dicke gemittelt eine geringere Wärmeausdehnung als die Bereiche mit hohem Matrixanteil. Somit führt eine Abkühlung des Bauteils von Prozesstemperatur auf Raumtemperatur zur Ausbildung von Erhebungen und Eindellungen, die so angeordnet sind wie die Verstärkungsstruktur im Bauteil. Dieser Effekt findet sowohl in der Größenordnung der einzelnen Verstärkungsfasern statt, was die Oberflächenrauigkeit und den Glanz verändert. Ebenso zeichnen sich auch die Merkmale des textilen Halbzeugs, also Faserbündel und Gewebe- oder Gelegestrukturen, ab.



**Abbildung 2.11:** Faserdurchzeichnen bei FVK

Das oben beschriebene Problem des Faserdurchzeichnens tritt prinzipiell bei allen FVK-Werkstoffen auf, deren Bestandteile während des Herstellungsprozesses unterschiedliche Volumenänderungen erfahren. Bei regelloser und homogener Verteilung der Verstärkungsfasern über die Bauteilfläche ist die resultierende Oberflächenstruktur ebenfalls regellos und homogen verteilt. Bei gerichteter Endlosfaserverstärkung mit regelmäßig strukturierten, textilen Halbzeugen (z.B. Gewebe oder Gelege) entsteht jedoch an der Oberfläche ein ebenfalls gerichtetes, regelmäßiges und gleichartig strukturiertes Abbild.

### 2.4.4 Wahrnehmung von Oberflächenqualität

Alle Bemühungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität zielen letztendlich darauf ab, dass die Oberfläche in der Wahrnehmung des Kunden ein hochwertiges optisches Erscheinungsbild hat. Wie aber werden Oberflächen vom Kunden überhaupt wahrgenommen?

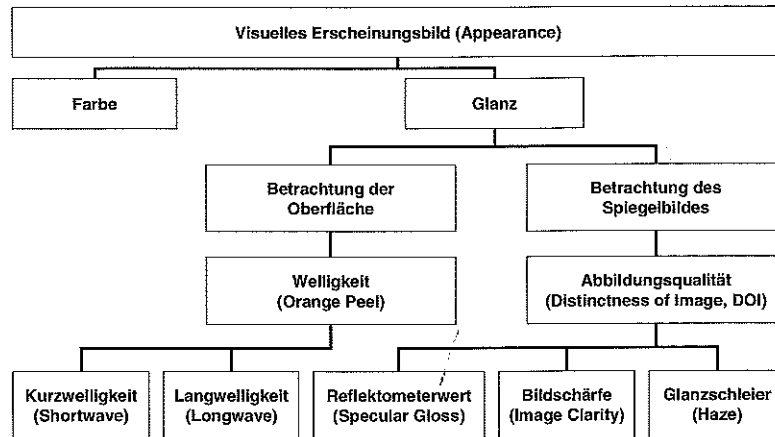


Abbildung 2.12: Verschiedene Kriterien zur optischen Bewertung von Oberflächen [19]

Einen Überblick über die verschiedenen Kriterien zur optischen Bewertung gibt Abbildung 2.12 (siehe auch [19]). Das visuelle Erscheinungsbild einer glatten, glänzenden Oberfläche setzt sich aus einer Vielzahl von optischen und physiologischen Effekten zusammen. Der Gesamteindruck „Glanz“ ergibt sich im Wesentlichen aus zwei verschiedenen Betrachtungsmöglichkeiten, nämlich

- der Betrachtung des Spiegelbildes und
- der Betrachtung der Oberfläche (siehe Abbildung 2.13).

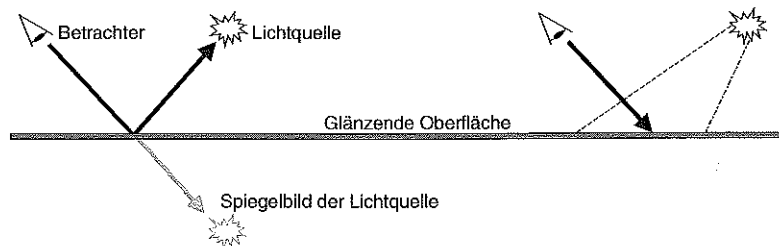


Abbildung 2.13: Betrachtung des Spiegelbildes oder der Oberfläche

### Betrachtung des Spiegelbildes

Glänzende Oberflächen haben die Fähigkeit, auftreffendes Licht gerichtet zu reflektieren. Fokussiert der Betrachter das Auge auf dieses Spiegelbild bzw. auf die gespiegelte Lichtquelle, so erhält er Informationen über die Abbildungseigenschaften der Oberfläche (engl. „Distinctness of Image, DOI“). Die Lichtquelle kann brillant oder matt erscheinen (Reflektometerwert, engl. „Specular Gloss“) und der dunkle Bereich um die Lichtquelle kann leicht erhellt erscheinen (Glanzschleier, engl. „Haze“). Bei Betrachtung einer Hell-Dunkel-Kante kann der Übergang scharf oder verschwommen sein (Bildschärfe, engl. „Image Clarity“). Der Glanz hängt hierbei von der Oberflächenrauigkeit, dem Betrachtungswinkel und der Beleuchtung ab. Die Oberflächenrauigkeit mit einer Feinstruktur von  $\lambda < 0,1$  mm kann vom Auge nicht mehr aufgelöst werden und bewirkt bei dieser Betrachtungsweise eine Verminderung der Bildschärfe. Eine diffuse Beleuchtung bewirkt erwartungsgemäß eine schlechtere Abbildungsqualität.

### Betrachtung der Oberfläche

Fokussiert der Betrachter das Auge auf die Oberfläche selbst, so erhält er einen Eindruck über die Größe und Form von sichtbaren Strukturen, die noch im Auflösungsvermögen des menschlichen Auges liegen. Solche Strukturen mit einer flächigen Ausdehnung von ca. 0,1 bis 10 mm Seitenlänge werden auf einer glänzenden Oberfläche als welliges Muster heller und dunkler Flecken wahrgenommen. In der Automobilindustrie mit hochglänzenden Decklacksystemen werden diese Oberflächenstrukturen oft als Orangenschaleneffekt (engl. „Orange Peel“) oder Verlaufsstörung bezeichnet. Dabei liegen die tatsächlichen Höhenunterschiede zwischen diesen Strukturen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern und somit unter dem Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Das von der Lichtquelle auf die Oberfläche einfallende Licht wird an den unterschiedlich geneigten Strukturelementen entsprechend reflektiert. Wird das Licht in Richtung Auge reflektiert, werden die Strukturelemente als hell wahrgenommen, bei Reflektion in andere Richtungen als dunkel. Das so erzeugte Hell-Dunkel-Muster wird vom System Auge/Gehirn als dreidimensionale Textur der Oberfläche interpretiert.

Das menschliche Auge kann bei normalem Sehvermögen und idealen Lichtverhältnissen etwa 35 Linien in einem Sehwinkel von  $1^\circ$  auflösen (siehe Abbildung 2.14). Bei Betrachtung von Oberflächen aus einer Entfernung von z.B. 2,5 m können daher Oberflächenstrukturen nur bis zu einer Wellenlänge von  $\lambda = 0,6$  mm wahrgenommen werden. Kleinere Strukturen sind aus dieser Entfernung nicht mehr auflösbar und bewirken statt dessen eine Glanzminderung. Aus geringer Entfernung, z.B. 50 cm, können wesentlich kleinere Oberflächenstrukturen bis zu einer kleinsten Wellenlänge von  $\lambda = 0,1$  mm wahrgenommen werden. Um dieses Auflösungsvermögen bei ferner und naher Betrachtung zu berücksichtigen, kann das Helligkeitsprofil in einen Anteil langwelliger Strukturen (0,6...10 mm) und einen Anteil für kurzwellige Strukturen (0,1...0,6 mm) aufgeteilt werden.

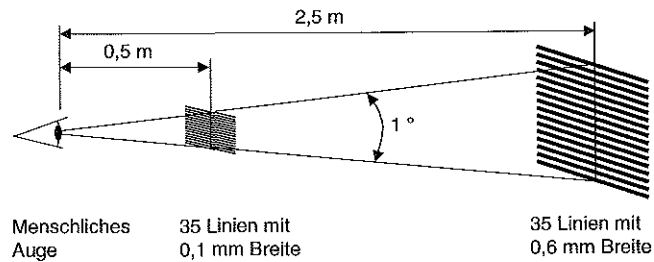


Abbildung 2.14: Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

### 2.4.5 Beurteilung durch Messverfahren

Zur wiederholbaren und objektiven Charakterisierung der Oberflächen in quantifizierbare Größen kommen verschiedenste Messverfahren zum Einsatz [100].

Zur Erfassung der Profildaten für die konventionelle Bestimmung der Rauheitskenngrößen ist das Tastschnittverfahren seit langem weit verbreitet. Hier wird das Oberflächenprofil in einzelnen oder eng nebeneinander liegenden Linien mit einer feinen Tastnadel abgetastet. Auf dem Tastschnittverfahren basieren der Daimler Benz (DB) Surface Analyzer, der Budd Surface Analyzer (siehe [36]) und das Taylor Hobson Profilometer. Die gemessenen Profillinien werden dabei direkt auf Rauheits- oder Welligkeitskennwerte umgerechnet.

Weiterhin bieten sich zahlreiche optische Verfahren an, die das Reflektionsvermögen der Oberfläche nutzen. Dabei wird von einer definierten Lichtquelle abgestrahltes Licht von der zu untersuchenden Oberfläche reflektiert und anschließend ausgewertet. Durch den Einsatz hochpräziser optischer und feinmechanischer Bauteile sind diese Verfahren hochauflösend und schnell.

Die Laser-Profilometrie arbeitet nach dem Prinzip der dynamischen Fokussierung (siehe Abbildung 2.15). Ein Laserstrahl wird durch eine elektromagnetisch aufgehängte Fokussiereinrichtung senkrecht auf die Oberfläche gerichtet. Der reflektierte Laserstrahl wird über dieselbe Optik zurückgeleitet und auf einen Fokusdetektor gelenkt. Liefert dieser ein Fehlersignal, z.B. durch eine Änderung des Abstandes des Objekts zur Linse, wird in einem Regelkreis solange dynamisch fokussiert, bis die exakte Fokuseinstellung gefunden ist. Anhand des Spulenstroms in der Fokussiereinrichtung kann über eine Software exakt die Höheninformation errechnet werden.

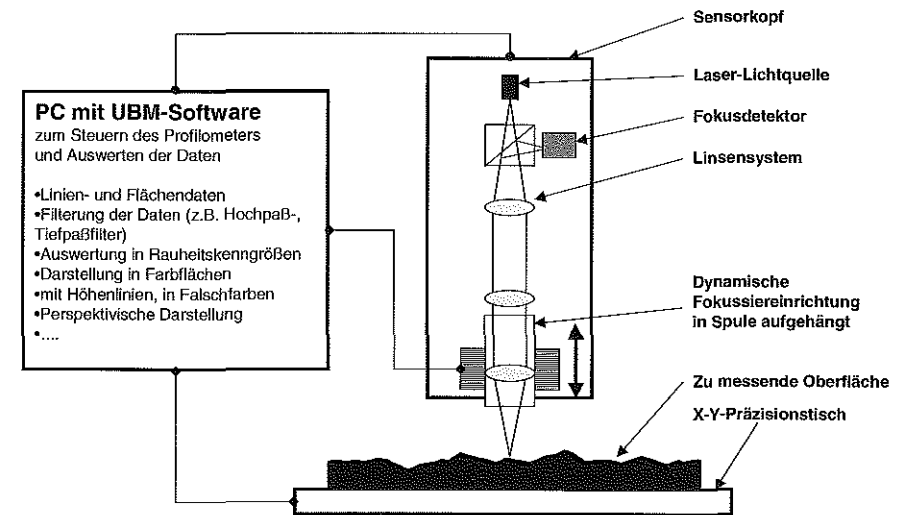


Abbildung 2.15: Aufbau und Funktionsweise des Laserprofilometers

Die Auflösung des in dieser Arbeit verwendeten Gerätes Mikrofokus UB 16 der Firma UBM, Ettlingen, beträgt etwa  $0,01 \mu\text{m}$  in Höhenrichtung und  $1 \mu\text{m}$  lateral. Über die Steuerungs- und Auswertesoftware werden zur Messung erforderliche Randbedingungen eingegeben (z.B. zu untersuchende Linien oder Flächen, Abtastrate, Schrittweite) und anschließend die gemessenen Höhendaten ausgewertet. Die hohe Auflösung und die Geschwindigkeit der Methode kommen besonders bei der Erzeugung von Flächendaten zum Tragen. Eine grafische Darstellung als Farbflächen oder 3D-Perspektiven ermöglicht eine umfangreiche Auswertung. Die Daten können über konventionelle und benutzerdefinierte Filter bearbeitet werden, z.B. Hochpass- und Tiefpassfilter. Über weitere Funktionen lassen sich verschiedenste Oberflächenkenngrößen (Rauheitskenngrößen, Traganteile...) über definierte Linien oder Flächen ermitteln. Aufgrund der Vielseitigkeit und Präzision der Messmethode kommt die Laserprofilometrie in der vorliegenden Arbeit intensiv zum Einsatz.

Ein weiteres optisches Messverfahren zur Ermittlung von Oberflächenstrukturen wird von der Firma Byk-Gardner mit dem Gerät Wave-Scan-Plus angeboten [19]. Mit diesem Handgerät wird eine Oberflächenstrecke von 100 mm abgefahren. Die erfassten Oberflächendaten werden anschließend automatisch ausgewertet. Diese Messmethode ist sehr schnell, handlich und mit geringem Aufwand durchführbar. Eine Laser-Punktlichtquelle beleuchtet die Probe unter einem Winkel von  $60^\circ$ . Auf der Gegenseite befindet sich unter dem gleichen Winkel ein Detektor und erfasst die Intensität des reflektierten Lichts. Je nach Neigungswinkel des betrachteten Strukturelements tritt eine hohe oder niedrige Lichtmenge in den Detektor (siehe Abbildung 2.16).

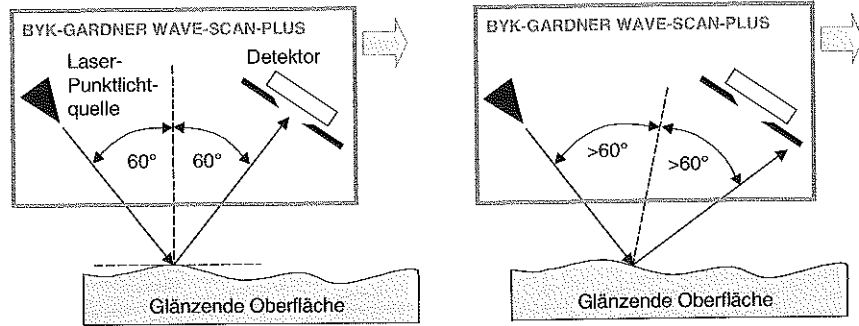


Abbildung 2.16: Messprinzip des Wave-Scan-Plus von Byk-Gardner

Im Gegensatz zu einem mechanischen Höhenprofil wird so das optische Profil der Oberfläche in einem Helligkeitsmuster ermittelt. In Anlehnung an die optische Wahrnehmung bei Betrachtung der Oberfläche werden die Helligkeitsmuster in kurzwellige und langwellige Anteile aufgeteilt. Die dimensionslosen Werte für die Kurzwelligkeit (engl. Short Wave, SW) und die Langwelligkeit (engl. Long Wave, LW) quantifizieren die Störungen mit  $\lambda = 0,1 \dots 0,6$  mm bzw.  $\lambda = 0,6 \dots 10$  mm. Da die Kennwerte aus dem Helligkeitsmuster über die statistische Größe der Varianz berechnet werden, gilt: Je niedriger die SW- und LW-Werte sind, desto weniger Abweichungen von der ideal glatten Oberfläche liegen vor.

Zu den optischen Beurteilungsverfahren zählen weiterhin das LORIA (Laser Optic Reflected Image Analyzer)-Verfahren von Ashland Chemical, das PGD (Profile, Gloss and Distinctness of Image)-Meter und das Diffracto-D-Sight von Diffracto Limited. Mit letzterem werden größere Flächen auf Defekte untersucht, welche optisch besonders hervorgehoben werden können (siehe Abbildung 2.17). Dieses Verfahren basiert auf dem Prinzip der zweifachen Spiegelung von Licht auf der gleichen Oberfläche. Durch die doppelte Reflektion an den gleichen Oberflächenpunkten können so Unregelmäßigkeiten auf großen Flächen von wenigen Mikrometern Amplitude und großer Ausdehnung sichtbar gemacht werden. Das mit einer Digitalkamera aufgenommene Bild kann mit dem Bild eines Referenzteils verglichen und ausgewertet werden.

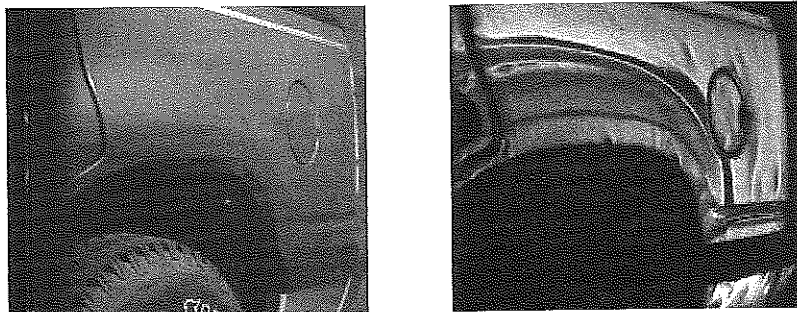


Abbildung 2.17: Bild eines Bauteils ohne und mit Diffracto-D-Sight [Diffracto Ltd.]

Von diesen zahlreichen verschiedenen Methoden wurden in der vorliegenden Arbeit vor allem die in Tabelle 2.6 aufgeführten eingesetzt. Für die Ermittlung von Kennwerten für die Oberflächenbeschaffenheit wurde die Methode Wave-Scan-Plus von Byk-Gardner angewendet. Für dieses Messverfahren liegen in einer firmeninternen Norm [11] die in Tabelle 2.7 angegebenen Grenzwerte für Class-A-Oberflächenqualität vor.

Tabelle 2.6: In dieser Arbeit intensiv genutzte Oberflächenmessverfahren

Methode	Ziel	Bemerkung
Wave-Scan-Plus von Byk-Gardner	Kennwerte für Lang- und Kurzwelligkeit (LW und SW)	Standard bei BMW zur Lackbewertung, BMW Group Norm
Laser-Profilometer von UBM	Erfassen Oberflächenstrukturen (Gestalt, Amplitude, Wellenlänge) Ermitteln von Rauwerten	zusätzliches Messverfahren zur besseren Beurteilung kurz- und langwelliger Strukturen

Tabelle 2.7: Grenzwerte für Wave-Scan-Plus von Byk-Gardner (nach BMW Norm GS 97003-1 [11])

Merkmal	Messverfahren, Kennwert	Gemessener Bereich	Forderung
Langwelligkeit	Wave-Scan, LW-Wert	horizontale Bauteile	< 8
Langwelligkeit	Wave-Scan, LW-Wert	vertikale Bauteile	< 26
Kurzwelligkeit	Wave-Scan, SW-Wert	alle Bauteile	< 35

Als Beispiel für eine Oberfläche, die derzeit der Class-A-Anforderung eines Automobil-Herstellers im Premium-PKW-Segment entspricht, sind in Abbildung 2.18 Laserprofilometer-Bilder einer Probe aus einem lackierten Stahlschiebedach gezeigt.

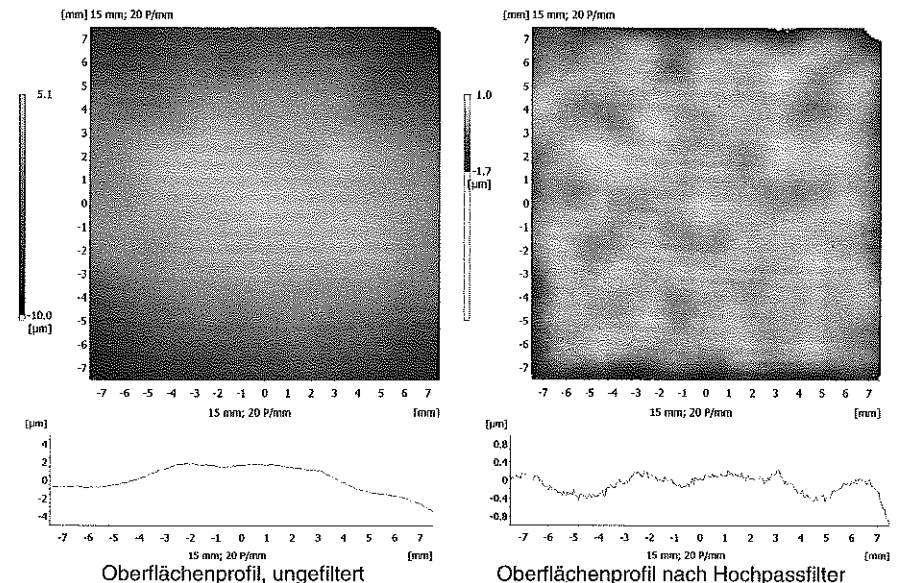


Abbildung 2.18: Laserprofilometer-Bilder eines lackierten Stahlschiebedaches

In der direkten Darstellung der Oberflächendaten links zeigt sich die Bomblierung des Stahl-schiebedachs in beide Richtungen. Rechts sind die Daten nach Filterung mit einem Hochpass-filter dargestellt. Die mit Wave-Scan gemessenen Welligkeitswerte sind  $LW=3,2$  und  $SW=13,3$ .

### 2.4.6 Optische Beurteilung

Neben apparativen Messverfahren kommt der visuellen Beurteilung der Oberflächenqualität eine entscheidende Bedeutung zu. Im Automobildesign z.B. wird zur optischen Begutachtung die Fahrzeugaußenhaut mit parallel angeordneten Leuchtstoffröhren direkt von oben beleuchtet, die dann auf der Oberfläche als Spiegelbilder in geraden und gekrümmten Linien über die Oberfläche verlaufen. Solche klar begrenzten Hell-Dunkel-Muster der Beleuchtung sind für eine visuelle Beurteilung günstig, da das System Auge/Gehirn aus der Reflektion der Muster zahlreiche Informationen gewinnen kann.

Durch die Betrachtung des Spiegelbildes der Lichtquelle kann auf die Abbildungseigenschaften Reflektionsvermögen, Bildschärfe und Glanzschleier geschlossen werden. Bei Betrachtung der Oberfläche selbst werden je nach Entfernung Form und Stärke der lang- und kurzwelligen Strukturen sichtbar, wie in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Zur Wahrnehmung der kurzwelligen Störungen ist eine Betrachtung aus kurzer Entfernung, z.B. aus 0,5 m, erforderlich. Sollen langwellige Strukturen erkannt werden, empfiehlt sich eine größere Entfernung, z.B. von 2,5 m.

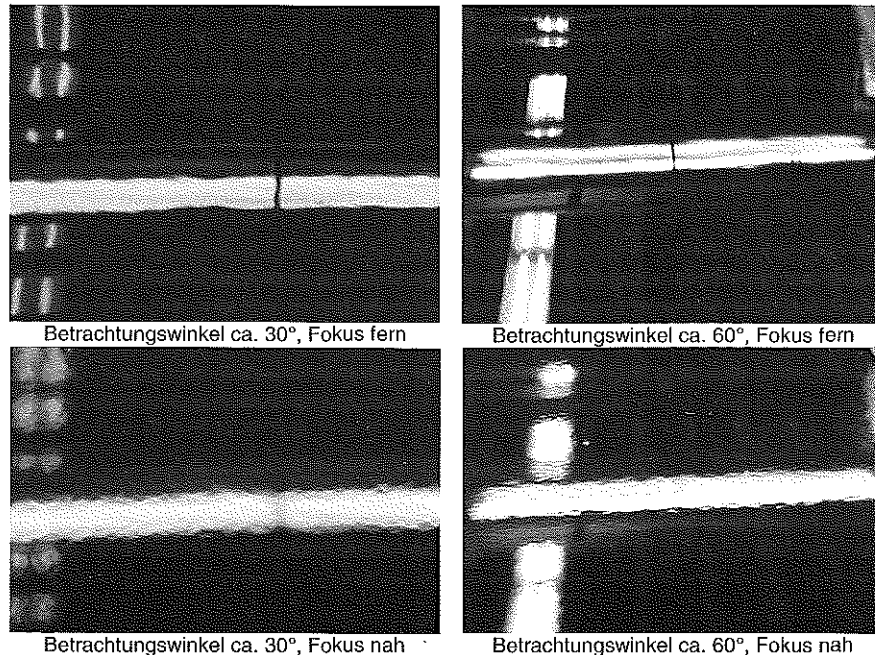


Abbildung 2.19: Spiegelbilder einer Leuchtstofflampe an einer lackierten CFK-Oberfläche

Eine Herausforderung bei der visuellen Beurteilung durch Personen ist die Auswertung des Beurteilungsergebnisses. Zur besseren Nachvollziehbarkeit müssen die Einzelkriterien aufgeschlüsselt und einzeln beurteilt werden. Für diese Einzelkriterien können Bewertungen abgegeben werden, z.B. in Skalen von 0-10 („10“ am besten). Diese Bewertungen können immer nur qualitativ sein, als Vergleich von Einzelteilen untereinander oder im Vergleich zu einem Referenzteil. Die Bewertung spiegelt die visuelle Wahrnehmung, das individuelle Empfinden des Betrachters wider und ist somit immer subjektiv. So kann sich durchaus die Tagesform des Betrachters verändern oder bei der Betrachtung von zahlreichen Oberflächen der Bewertungsmaßstab verschieben. Um diesen Effekt abzumindern, ist eine Beurteilung durch mehrere Personen unter gleichen Beobachtungs- und Beurteilungsvorgaben zwingend.

## 2.5 Zielsetzung und Vorgehensweise

### 2.5.1 Aufgabenstellung

Um das Leichtbaupotenzial der faserverstärkten Kunststoffe für Bauteile in der Fahrzeugaußenhaut zu erschließen, wurden in den vorangegangenen Kapiteln die Anforderungen an automobile Außenhautbauteile analysiert und geeignete Werkstoff-Verfahrens-Kombinationen zur deren Herstellung betrachtet. Als Ergebnis dieser Voruntersuchungen wird das RTM-Verfahren für Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe für eine Weiterentwicklung zu einem serientauglichen Fertigungsverfahren von FKV-Außenhautbauteilen ausgewählt. Die Untersuchung der Oberflächenanforderungen zeigt, dass die größte Herausforderung für einen Serieneinsatz derzeit die Class-A-Oberflächenqualität ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Erfüllung dieser Oberflächenanforderungen nach den Standards der Automobilindustrie mit der Werkstoff-Verfahrens-Kombination CFK-RTM. Das Faserdurchzeichnen stellt neben anderen typischen Oberflächenfehlern von CFK das Hauptproblem für die Oberflächenqualität dar. Deshalb zielt die vorliegende Entwicklung vorrangig auf eine Reduzierung oder Eliminierung dieses Phänomens, so dass nach der Lackierung die geforderten Welligkeitswerte erfüllt werden und die optische Beurteilung bestanden wird. Die Referenz für die Oberflächenqualität, die erreicht werden soll, stellen lackierte Stahlblech-Bauteile aus der laufenden Serienproduktion dar, wie z.B. ein lackiertes Stahlschiebedach. Durch die Verbesserung der Oberflächenqualität der CFK-Bauteile soll die bisher notwendige manuelle Nacharbeit vor der Lackierung vermieden und somit das Premium-PKW-Segment mit weitaus höheren Stückzahlen als bisher (nur Sonderserien, Kleinstserien) erschlossen werden.

Für eine erfolgreiche Umsetzung in Bauteilentwicklungen und in einer ersten Fahrzeugserie müssen allerdings weitere Hauptanforderungen erfüllt werden, allen voran die Wirtschaftlichkeit. Diese Einordnung des Themas der vorliegenden Arbeit in das Gesamthema „Hochleistungs-FKV in der Fahrzeugaußenhaut“ ist in Abbildung 2.20 dargestellt.

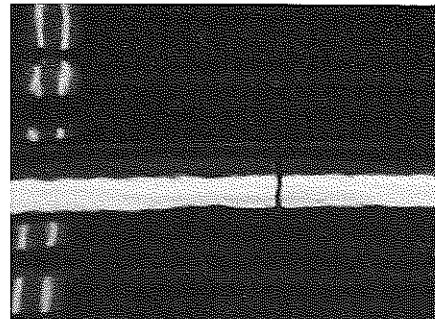


In der direkten Darstellung der Oberflächendaten links zeigt sich die Bombierung des Stahl-schiebedachs in beide Richtungen. Rechts sind die Daten nach Filterung mit einem Hochpass-filter dargestellt. Die mit Wave-Scan gemessenen Welligkeitswerte sind  $LW=3,2$  und  $SW=13,3$ .

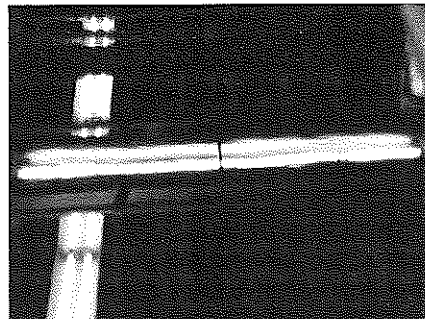
### 2.4.6 Optische Beurteilung

Neben apparativen Messverfahren kommt der visuellen Beurteilung der Oberflächenqualität eine entscheidende Bedeutung zu. Im Automobildesign z.B. wird zur optischen Begutachtung die Fahrzeugaußenhaut mit parallel angeordneten Leuchtstoffröhren direkt von oben beleuchtet, die dann auf der Oberfläche als Spiegelbilder in geraden und gekrümmten Linien über die Oberfläche verlaufen. Solche klar begrenzten Hell-Dunkel-Muster der Beleuchtung sind für eine visuelle Beurteilung günstig, da das System Auge/Gehirn aus der Reflektion der Muster zahlreiche Informationen gewinnen kann.

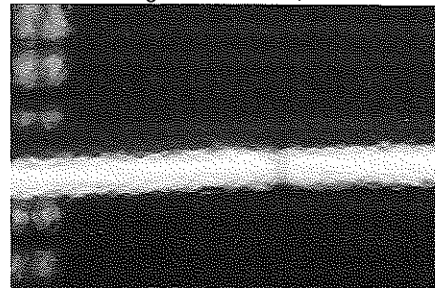
Durch die Betrachtung des Spiegelbildes der Lichtquelle kann auf die Abbildungseigenschaften Reflektionsvermögen, Bildschärfe und Glanzschleier geschlossen werden. Bei Betrachtung der Oberfläche selbst werden je nach Entfernung Form und Stärke der lang- und kurzwelligen Strukturen sichtbar, wie in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Zur Wahrnehmung der kurzwelligen Störungen ist eine Betrachtung aus kurzer Entfernung, z.B. aus 0,5 m, erforderlich. Sollen langwellige Strukturen erkannt werden, empfiehlt sich eine größere Entfernung, z.B. von 2,5 m.



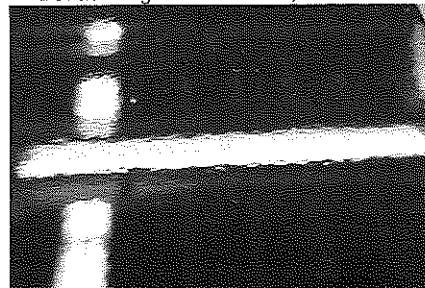
Betrachtungswinkel ca. 30°, Fokus fern



Betrachtungswinkel ca. 60°, Fokus fern



Betrachtungswinkel ca. 30°, Fokus nah



Betrachtungswinkel ca. 60°, Fokus nah

Abbildung 2.19: Spiegelbilder einer Leuchtstofflampe an einer lackierten CFK-Oberfläche

Eine Herausforderung bei der visuellen Beurteilung durch Personen ist die Auswertung des Beurteilungsergebnisses. Zur besseren Nachvollziehbarkeit müssen die Einzelkriterien aufgeschlüsselt und einzeln beurteilt werden. Für diese Einzelkriterien können Bewertungen abgegeben werden, z.B. in Skalen von 0-10 („10“ am besten). Diese Bewertungen können immer nur qualitativ sein, als Vergleich von Einzelteilen untereinander oder im Vergleich zu einem Referenzteil. Die Bewertung spiegelt die visuelle Wahrnehmung, das individuelle Empfinden des Betrachters wider und ist somit immer subjektiv. So kann sich durchaus die Tagesform des Betrachters verändern oder bei der Betrachtung von zahlreichen Oberflächen der Bewertungsmaßstab verschieben. Um diesen Effekt abzumindern, ist eine Beurteilung durch mehrere Personen unter gleichen Beobachtungs- und Beurteilungsvorgaben zwingend.

## 2.5 Zielsetzung und Vorgehensweise

### 2.5.1 Aufgabenstellung

Um das Leichtbaupotenzial der faserverstärkten Kunststoffe für Bauteile in der Fahrzeugaußenhaut zu erschließen, wurden in den vorangegangenen Kapiteln die Anforderungen an automobiler Außenhautbauteile analysiert und geeignete Werkstoff-Verfahrens-Kombinationen zur deren Herstellung betrachtet. Als Ergebnis dieser Voruntersuchungen wird das RTM-Verfahren für Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe für eine Weiterentwicklung zu einem serientauglichen Fertigungsverfahren von FKV-Außenhautbauteilen ausgewählt. Die Untersuchung der Oberflächenanforderungen zeigt, dass die größte Herausforderung für einen Serieneinsatz derzeit die Class-A-Oberflächenqualität ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Erfüllung dieser Oberflächenanforderungen nach den Standards der Automobilindustrie mit der Werkstoff-Verfahrens-Kombination CFK-RTM. Das Faserdurchzeichnen stellt neben anderen typischen Oberflächenfehlern von CFK das Hauptproblem für die Oberflächenqualität dar. Deshalb zielt die vorliegende Entwicklung vorrangig auf eine Reduzierung oder Eliminierung dieses Phänomens, so dass nach der Lackierung die geforderten Welligkeitswerte erfüllt werden und die optische Beurteilung bestanden wird. Die Referenz für die Oberflächenqualität, die erreicht werden soll, stellen lackierte Stahlblech-Bauteile aus der laufenden Serienproduktion dar, wie z.B. ein lackiertes Stahlschiebedach. Durch die Verbesserung der Oberflächenqualität der CFK-Bauteile soll die bisher notwendige manuelle Nacharbeit vor der Lackierung vermieden und somit das Premium-PKW-Segment mit weitaus höheren Stückzahlen als bisher (nur Sonderserien, Kleinstserien) erschlossen werden.

Für eine erfolgreiche Umsetzung in Bauteilentwicklungen und in einer ersten Fahrzeugserie müssen allerdings weitere Hauptanforderungen erfüllt werden, allen voran die Wirtschaftlichkeit. Diese Einordnung des Themas der vorliegenden Arbeit in das Gesamtthema „Hochleistungs-FKV in der Fahrzeugaußenhaut“ ist in Abbildung 2.20 dargestellt.

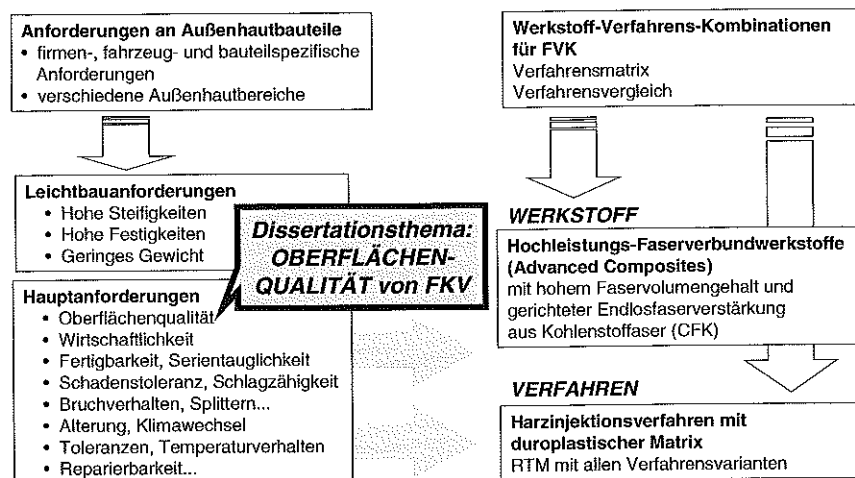


Abbildung 2.20: Einordnung des Themas „Oberflächenqualität von Hochleistungs-FKV“

Zielanwendungen sind somit die Außenhautbauteile mit hohen Anforderungen sowohl an die Oberflächenqualität als auch an die strukturellen Eigenschaften. Darunter fallen neben reinen Außenhaut-Anbauteilen (z.B. Klappen im horizontalen Außenhautbereich) auch Strukturbauteile mit direkt sichtbaren Anteilen (z.B. der Seitenrahmen im vertikalen Außenhautbereich). Nur hier ist eine ausreichende Nutzung der hervorragenden Leichtbaueigenschaften zu erwarten, die den zusätzlichen Aufwand in Entwicklung und Herstellung rechtfertigen.

## 2.5.2 Vorgehensweise

Der inhomogene Aufbau des Werkstoffs CFK zusammen mit dem Schrumpf der Matrix während des Herstellungsprozesses stellen die grundlegenden Ursachen für das Faserdurchzeichnen dar. Als Lösungsansätze der Ursachenbekämpfung kommen hier in Frage:

- Reduzierung der Schwindung der Matrix durch
  - Einsatz / Entwicklung von schrumpfarmen Harzsystemen,
  - Wählen von geeigneten Verfahrensparametern für minimalen Schrumpf,
  - Ausgleichen von Schrumpf während des Herstellungsprozesses
- Vermeiden von starken Inhomogenitäten im Werkstoff durch
  - Einsatz / Entwicklung möglichst gleichmäßiger Verstärkungshalbzeuge,
  - Optimieren der Halbzeugverarbeitung / Preformherstellung und
  - Einsatz / Entwicklung von Oberflächenmaterialien zum Ausgleich von Inhomogenitäten

Weiterhin können die auftretenden Oberflächeneffekte durch Ausgleich und Überdeckung vermindert werden. Zur Symptombekämpfung zählen die Lösungsansätze:

- Beschichtungen zum Oberflächenausgleich im Prozess, z.B. Gelcoats oder Folien
- Beschichtungen nach dem Prozess, z.B. Grundierungen und Kunststofflackierung

Um einen Mehraufwand in der Symptombekämpfung zu vermeiden, muss die Ursachenbekämpfung immer vorrangig betrieben werden. Durch die Auswahl geeigneter Materialien und Herstellungsparameter kann so im Idealfall die aufwendigere Nachbesserung durch zusätzliche Beschichtungen im oder nach dem Prozess vermieden werden.

Die Qualität des betrachteten Gesamtsystems „Automobil-Außenhautbauteil“ wird immer im lackierten Endzustand bewertet. Sie ist das Resultat aus eingesetzten Materialien, Herstellungsprozess und anschließender Beschichtung mit Lack. Ebenso wie bei Außenhautbauteilen aus anderen Materialien, wie Stahl, Aluminium, unverstärkten Thermoplasten oder SMC, haben auch bei CFK alle Komponenten und Verarbeitungsschritte Einfluss auf das Endergebnis. Auch für diese Werkstoffe müssen zum Erreichen einer hohen Oberflächenqualität alle Einflussgrößen optimiert und aufeinander abgestimmt sein.

Deshalb ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, geeignete und abgestimmte Material-Verfahrens-Beschichtungs-Kombinationen zu finden, um die Class-A-Anforderungen mit lackierten CFK-Bauteilen zu erreichen. Die Oberflächenqualität von CFK-Bauteilen stellt in ihren Ursachen und Wirkungen ein komplexes und stark vernetztes Problem dar. Da für alle Komponenten und Teilschritte Abhängigkeiten bestehen, kann nur ein Optimieren des Gesamtsystems und nicht nur einzelner Komponenten erfolgversprechend sein.

Deshalb gliedern sich in der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Optimierung in folgende drei Bereiche:

- Materialentwicklung der Einzelkomponenten Matrix und Faserhalbzeuge
- Verfahrensentwicklung für das RTM-Verfahren
- Entwicklung von Beschichtungen und eine Abstimmung der nachträglichen Lackierung

Diese Untersuchungen in den folgenden Kapiteln sind im Flussdiagramm in Abbildung 2.21 dargestellt.

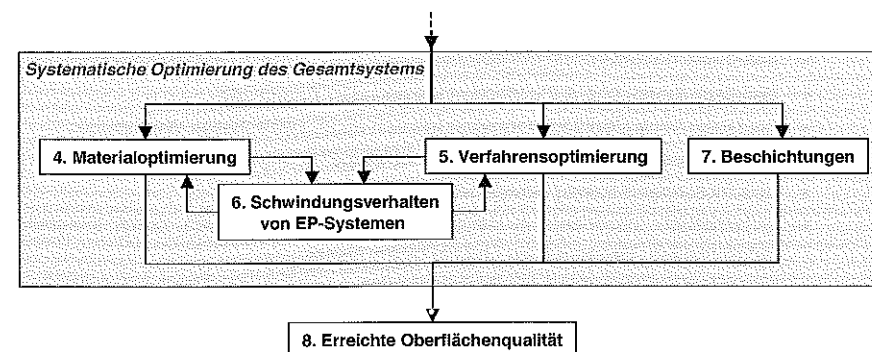


Abbildung 2.21: Struktur der vorliegenden Entwicklung im Flussdiagramm

### 3 Das Resin-Transfer-Moulding-Verfahren

#### 3.1 Merkmale des RTM-Verfahrens

Das RTM-Verfahren gehört zur Gruppe der Harzinjektionsverfahren (engl. Liquid Composite Moulding, LCM). Aufgrund des steigenden Interesses an dieser Verfahrensgruppe finden sich in der Literatur zahlreiche Quellen, in denen das RTM-Verfahren, die verwendete Werkzeugtechnik, die eingesetzten Materialien und Hilfsmittel ausführlich beschrieben werden (siehe [103], [52], [118], [98], [83], [56], [16], und [5]). Unter anderem gehen Rudd, Long, Kendall und Mangin in einem Buch [107] auf die Liquid Composite Moulding-Technologien insgesamt und in mehreren Artikeln auf Teilaspekte ein (siehe [65], [81], [106], [108], [80], [64] und [76]).

In der Industrie sind zahlreiche Abwandlungen des RTM-Verfahrens im Einsatz, die sich oft nur marginal voneinander unterscheiden. Dabei haben alle folgende Merkmale gemeinsam: Im Unterschied zu den Injection Moulding (IM)- und Compression Composite Moulding (CCM)-Verfahren werden bei den LCM-Verfahren die Verstärkungsfasern in Form von textilen Halbzeugen trocken ins offene Werkzeug eingebracht und erst nach dem Schließen des Werkzeuges im Injektionsvorgang mit der Matrix durchtränkt und in diese eingebettet. Somit können in den LCM-Verfahren vom Injektionsprozess oder Fließpressen unabhängige Faserlängen und -orientierungen realisiert werden, was sehr hohe mechanische Eigenschaften ermöglicht. Beim RTM-Verfahren werden Bauteileigenschaften und -geometrie im Wesentlichen durch die beiden Schritte Preform-Herstellung und Injektion bestimmt.

Es ergeben sich im Vergleich mit anderen Verfahren zur Herstellung von FVK folgende Hauptmerkmale und Vorteile für das RTM-Verfahren:

- Hochleistungsverstärkung möglich mit gerichteter Endlosfaserverstärkung und hohem Faservolumengehalt (bis ca. 60%)
- Verwendbarkeit verschiedener Verstärkungsfasern: Kohlenstoff, Glas, Aramid...
- Integrationsmöglichkeiten (lokale Verstärkungen, Inserts, Einleger...)
- hohe Gestaltungsfreiheit (hohe Komplexität möglich, sehr große Bauteile möglich)
- sehr hohe Bauteilqualität möglich (sehr gute Imprägnierung mit geringer Porosität)
- definierte Innen- und Außenflächen mit geringen Toleranzen
- beidseitig hohe Oberflächenqualität möglich durch zweiseitige Werkzeuge
- endkonturgenaue Fertigung möglich („net shape“ oder „near net shape“)
- geschlossener Prozess, geringe MAK und Umweltbelastung
- wirtschaftlich, besonders in kleinen bis mittleren Stückzahlen, durch Integrationsmöglichkeiten, Teilereduktion und niedrigem Invest
- weitgehend automatisierbare Prozessschritte, somit Potenzial für Serienfertigung und Erhöhung der Wirtschaftlichkeitsgrenze

Aufgrund dieser Vorteile hat der RTM-Prozess besonders in der Luft- und Raumfahrtindustrie an vielen Stellen das Handlaminierten und das Autoklav-Verfahren verdrängen können.

Aufgrund geringerer Zykluszeiten und höherer Automatisierung kann das RTM-Verfahren schon ab niedrigen Stückzahlen wirtschaftlich günstiger sein und dabei hohe Qualität reproduzierbar liefern. Im Vergleich zu den Pressverfahren, die aufgrund des hohen Anlagen- und Werkzeuginvests erst in hohen Stückzahlen wirtschaftlich sind, kann das RTM-Verfahren bei mittleren Seriengrößen erfolgreich konkurrieren. Neben den guten erreichbaren Bauteileigenschaften aufgrund der gerichteten Endlosfaserverstärkung kommen hier die niedrigeren Investitionsaufwendungen und das Integrationspotenzial des Verfahrens zur Geltung.

Der serientaugliche RTM-Prozess gliedert sich in mehrere Schritte von den Rohmaterialien zum fertigen Bauteil, wie in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist.

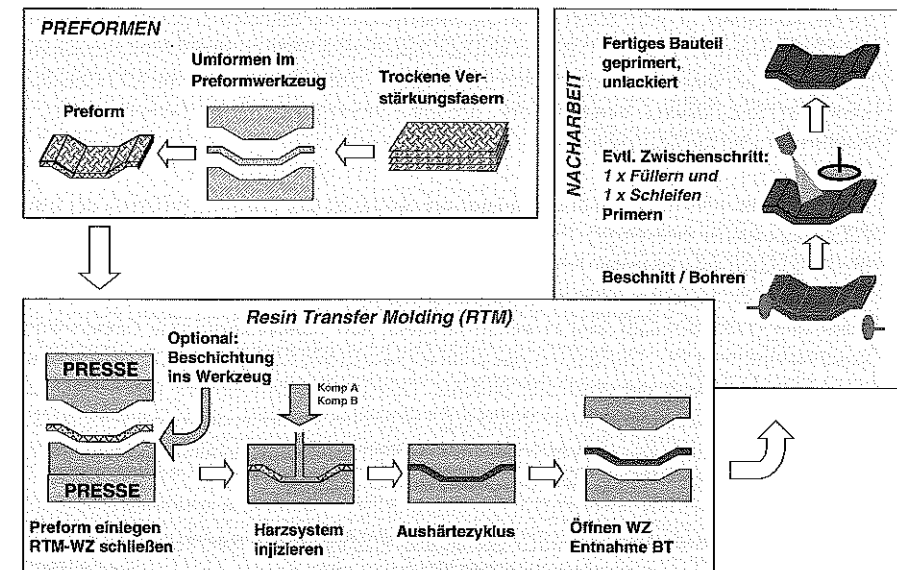


Abbildung 3.1: Schematischer Ablauf des RTM-Prozesses

#### 3.1.1 Vorformen der Verstärkungsstrukturen

Das Vorformen der textilen Verstärkungsstrukturen zu einem handhabbaren und robusten Vorformling in der Bauteilgeometrie mit der gewünschten Orientierung der Faserverstärkung (engl. „Preform“) ist im RTM-Prozess von entscheidender Bedeutung für die Bauteilqualitäten und die Wirtschaftlichkeit der Bauteilherstellung. Während in früheren Jahren noch Glasfasermatten als Verstärkung mit der Schere zugeschnitten und dann in losen Einzelstücken von Hand in das RTM-Werkzeug eingelegt wurden, so haben heute in diesem Prozessschritt Automatisierung und Qualitätssicherung Einzug gehalten.

Im Prozess von den Fasern zum textilen Vorformling gibt es verschiedene Wege, die z.T. kombiniert werden. Zum einen können die Fasern mit Schneid- und Sprühköpfen auf eine Preform-Schablone oder sogar direkt ins RTM-Werkzeug gesprüht und mittels beigemischten thermoplastischen oder reaktiven Bindern fixiert werden. Dieses dem Faserspritzen sehr ähnliche Preforming-Verfahren wurde von den Firmen Aplicator und Owens Corning zum P4-Prozess („Programmable Powder Preforming Process“) weiterentwickelt (siehe [2] und [43]). Die Vorteile sind der geringe Materialverschnitt und die Möglichkeit, Faserlänge und Faserausrichtung beim Sprühen beeinflussen zu können.

Weitere Möglichkeiten bietet die Verwendung textiler Flächengebilde aus Verstärkungsfasern, wie z.B. Gewebe, Gelege oder Wirrfasermatten. Diese Flächengebilde können zu Lagenaufbauten kombiniert, zugeschnitten und in die dreidimensionale Bauteilform gebracht werden. Zur Ausbildung von besonderen 3D-Elementen wie Rippen oder anderen Profilverstärkungen (engl. „Stringer“), zum Stabilisieren der Kanten des Preforms und zum Anbinden von Kräfteleitungsstrukturen und lokalen Verstärkungen (Doppler) kommt inzwischen immer häufiger die Nähtechnik zum Einsatz (siehe [120], [115] und [90]).

Sehr verbreitet und im industriellen Maßstab umgesetzt ist das Thermo-Umformen der textilen Flächengebilde in zweiseitigen Preform-Werkzeugen. Insbesondere bei der Herstellung von glasfaserverstärkten Bauteilen im RTM-Verfahren ist die Glasmattenumformung heute Stand der Technik und in hohem Maße automatisiert (siehe auch [40] und [81]). Die bereits mit Binder versehene Glasfasermatte wird in einem Heizfeld zum Aufschmelzen des Binders erhitzt. Anschließend folgt der Transport in das offene Preform-Werkzeug, welches beim Schließen über die Pressenkraft die Glasmatte umformt. Durch die Erstarrung des thermoplastischen Binders beim Abkühlen im Preform-Werkzeug werden die Fasern in dieser Bauteilform fixiert. Mittels Spannrahmen oder Haltemechanismen werden Membranspannungen in den Glasmatten erzeugt, um Faltenbildung beim Umformen zu vermeiden.

Diese Umformtechnik lässt sich auch auf andere Flächengebilde wie Gewebe oder Gelege übertragen (siehe [8], [108], [80] und [17]). Dabei entstehen, ebenso wie im Organoblechumformen, gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Umformbarkeit und Faltenbildung. Da die Dehnung der Einzelfasern, z.B. bei Kohlenstofffasern oder Glasfasern, sehr eingeschränkt ist, müssen die Gewebe oder Gelege die dreidimensionale Umformung durch Fasergleiten und Scherung ermöglichen. Dieses Umformverhalten wird entscheidend von der Gestaltung der Halbzeuge, insbesondere der Bindungsart, beeinflusst.

### 3.1.2 Der RTM-Zyklus

Der eigentliche RTM-Zyklus teilt sich in 4 Hauptschritte auf:

1. Vorbereitung des Werkzeugs, Einlegen des Preforms, Schließen des Werkzeugs
2. Injektion des Matrixmaterials
3. Aushärtung des Matrixmaterials
4. Öffnen des Werkzeugs, Bauteilentformung, Reinigung des Werkzeugs

Zur Vorbereitung des Werkzeugs zählen z.B. das Auftragen externer Trennmittel und das Einbringen möglicher Beschichtungen, wie z.B. Gelcoats, ins Werkzeug. Anschließend wird die Faserverstärkung in Form von einem oder mehreren Preforms eingelegt. Sandwichstrukturen können als vorbereitete „Mumie“ oder als Aufbau aus Decklagen und Kernen einzeln ins offene Werkzeug transportiert werden. Nach dem Vorbereiten und Beladen des Werkzeugs wird dieses über die Schließeinheit, z.B. einen Formenträger oder eine Presse, geschlossen.

Die Injektion des Matrixmaterials erfolgt über einen Druckgradienten zwischen Harz- und Härterzufuhr und der Entlüftungsstelle des Werkzeugs. Es kommen Misch- und Dosier-Anlagen zum Einsatz, mit denen die Einzelkomponenten temperiert, exakt dosiert und mit Druck gefördert werden können. Die Vermischung der flüssigen Einzelkomponenten erfolgt statisch oder dynamisch in einem Mischkopf. Die Injektion kann durch Erzeugen eines Unterdrucks in der Kavität mittels einer Vakuumpumpe unterstützt werden. Das Matrixmaterial muss die mit Fasermaterial dicht gefüllte Werkzeugkavität vom Anguss bis zur Entlüftung möglichst rasch und ohne Luftschlüsse und Porenbildung komplett füllen. Nach der vollständigen Füllung der Kavität wird zuerst die Entlüftung verschlossen, der Injektionsvorgang gestoppt und anschließend auch der Anguss verschlossen.

Nach dem Füllen der Kavität folgt die Aushärtephase, in der die Matrix zunächst vom flüssigen in den festen Zustand übergeht (Gel-Punkt). In der weiteren Reaktion bilden die Matrixmoleküle mit zunehmender Vernetzung ein dichtes räumliches Netzwerk. Mit zunehmendem Vernetzungsgrad entwickeln sich auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften des festen Kunststoffes, wie z.B. der E-Modul und die Medienbeständigkeit. Die Phasen Injektion und Aushärtung stellen die beiden Kernschritte der Bauteilherstellung beim RTM-Verfahren dar. Die komplexen Vorgänge und Auswirkungen verschiedener Materialien und Prozessparameter während dieser Phase sind beispielsweise in [107], [65] und [76] untersucht worden. Die beiden flüssigen Matrixkomponenten werden zu Beginn der Injektion gemischt, was den Start der Vernetzungsreaktion auslöst. Die Prozessparameter bei Injektion und Aushärtung haben entscheidenden Einfluss auf die Bauteilqualität (siehe [50], [62] und [82]). Zur Prozesskontrolle kommen meist Druck-, Temperatur-, und Aushärtesensoren (siehe [107], [70] [45]) zum Einsatz.

Ein typischer Druckverlauf des RTM-Verfahrens ist in Abbildung 3.2 mit Kennzeichnung der drei Phasen Injektion, Nachdruck und Aushärtung dargestellt. In Abbildung 3.3 ist der Injektionsvorgang vergrößert gezeigt. Die drei Drucksensoren sind in Fließrichtung zwischen Anguss und Entlüftung in gleichen Abständen angeordnet. Der Vergleich der drei Drucksignale während des Injektionsvorgangs zeigt den Druckverlust bzw. den Druckbedarf beim Tränken der Faserhalbzeuge über die Fließlänge. Nach dem Füllen der Kavität wird zunächst die Entlüftung verschlossen und der Innendruck im Werkzeug durch Weiterfördern erhöht.

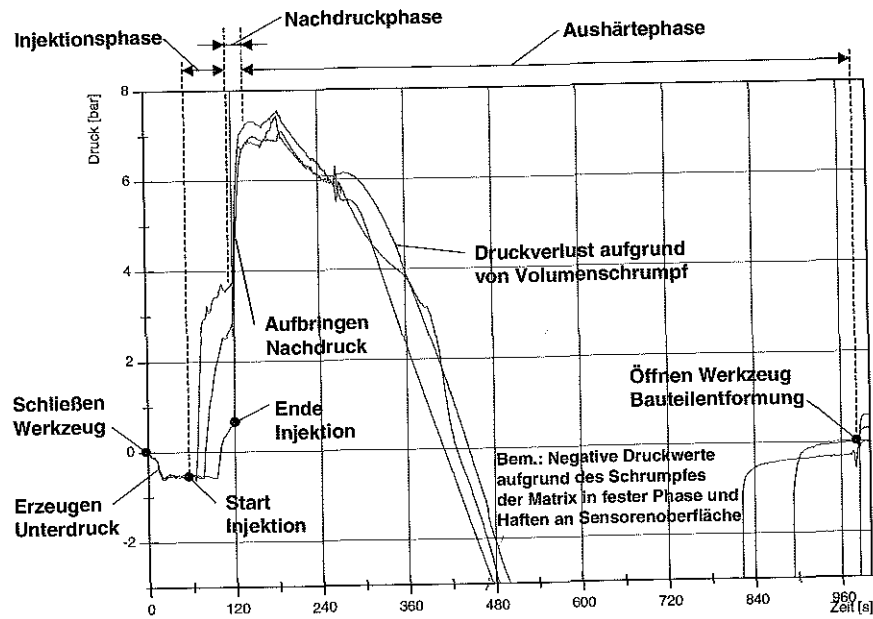


Abbildung 3.2: Druckverläufe in einem typischen RTM-Versuch

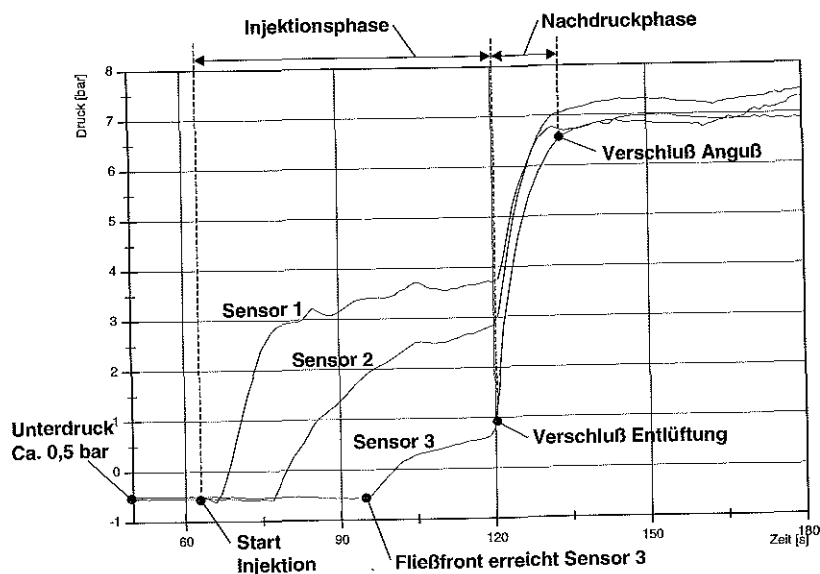


Abbildung 3.3: Druckverläufe während der Injektionsphase eines RTM-Versuchs

Am Ende der Nachdruckphase folgt das Verschließen des Angusses. Der erzeugte hydrostatische Druck im Matrixmaterial wirkt zu Beginn der Aushärtung über die gesamte Bauteilfläche. Der rasch einsetzende Druckverlust wird durch die fortschreitende Vernetzung und den einhergehenden chemischen Schrumpfung des Matrixmaterials bewirkt.

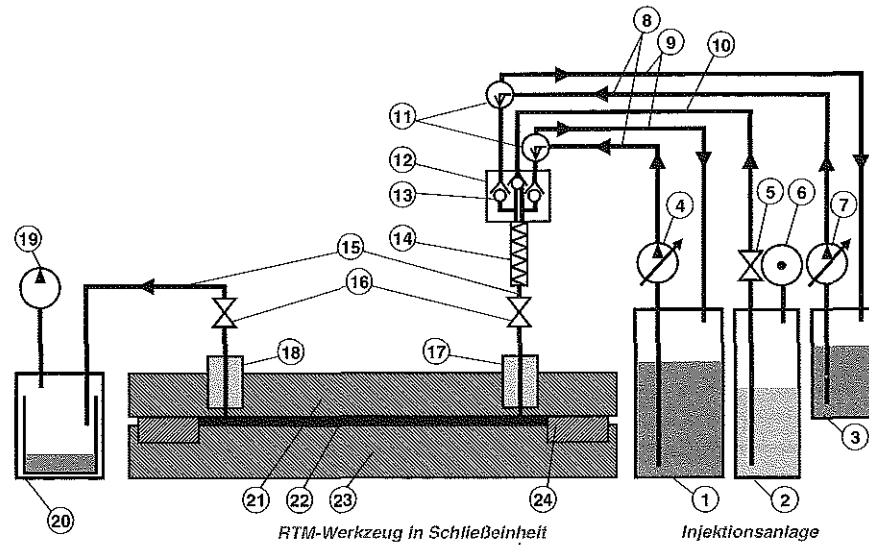
Nach einer ausreichenden Vernetzung des Matrixmaterials kann das Öffnen des Werkzeugs über die Schließeinheit und die Entformung des Bauteils erfolgen, in diesem Fall ca. 15 min nach Start der Injektion. Vor dem nächsten Zyklus muss das Werkzeug bei Bedarf von Matrixrückständen in Problembereichen gereinigt werden. Mit diesem Schritt ist der RTM-Zyklus, den das Werkzeug wiederholt durchläuft, abgeschlossen. Die Gesamtzykluszeit dieses Werkzeugdurchlaufs wird im Wesentlichen von Injektions- und Aushärtephase bestimmt. Je nach Bauteilgeometrie, Faserverstärkung, Anlagentechnik und vor allem Viskosität des Matrixsystems kann die Injektionsphase von einigen Sekunden bis zu mehreren Minuten dauern. Abhängig von der Prozesstemperatur und der Reaktivität des Matrixsystems nimmt der Aushärtevorgang eine Zeit von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden in Anspruch.

### 3.1.3 Nachbearbeitung

An die Rohteilfertigung im RTM-Verfahren schließen sich noch einige Bearbeitungsschritte bis zum fertigen Bauteil an. Da meist noch ein Harz- oder sogar Faserüberstand an den Bauteilrändern in der Werkzeuggrenzebene verbleibt, muss dieser per Hand oder automatisch durch Schneiden, Fräsen oder Schleifen entfernt werden. Bei nicht endkonturgenauer Fertigung ist ein Konturfräsen des Bauteils erforderlich, was bei „net shape“-Fertigung entfällt. Für Kräfteinleitungen oder Durchbrüche schließen sich weitere Bohr- und Frässhritte an. Für hohe Oberflächenqualität kann auch flächiges Schleifen erforderlich sein. Somit entsteht aus dem Rohteil in den meisten Fällen erst durch die Nachbearbeitung das fertige RTM-Bauteil. Bei zusätzlichen Anbauteilen oder bei mehrschaligen Bauteilen folgen zudem noch Fügeschritte wie z.B. Kleben, um fertige Zusammenbauten zu erhalten.

## 3.2 Versuchsaufbau zur Musterteileherstellung

Die systematischen Untersuchungen zu Materialien, RTM-Verfahren und Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität wurden anhand von Musterteilen durchgeführt. Als Geometrie der Musterteile wurde eine Platte mit den Maßen 300 mm x 700 mm gewählt, um einerseits den Material- und Anlagenaufwand zur Herstellung der Muster gering zu halten und andererseits ausreichend große Flächen zum Beschichten, Lackieren und Beurteilen der Oberflächen zu erhalten. Der Versuchsaufbau zur Musterteileherstellung ist schematisch in Abbildung 3.4 gezeigt. Die zentralen Bestandteile des Versuchsaufbaus sind das RTM-Werkzeug, die Schließeinheit und die Injektionsanlage. Weiterhin kamen zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der RTM-Versuche Hilfsmittel zum Einsatz, wie eine Hand-sprühpistole zum Trennmittelauftrag, ein Stanzmesser und eine Stanzpresse zum konturgenauen Beschnitt der Faserhalbzeuge und Temperatur- und Drucksensoren mit Hard- und Software zur Messdatenerfassung.



- |    |                                 |    |                               |
|----|---------------------------------|----|-------------------------------|
| 1  | Komponentenbehälter A           | 13 | Rückschlagventile             |
| 2  | Spülmittelbehälter              | 14 | Stätikmischer                 |
| 3  | Komponentenbehälter B           | 15 | Rohrleitungen                 |
| 4  | Zahnradpumpe Komponente A       | 16 | Absperrventile                |
| 5  | Spülmittelventil                | 17 | Anguss-Einsatz                |
| 6  | Druckluftzufuhr                 | 18 | Entlüftungs-Einsatz           |
| 7  | Zahnradpumpe Komponente B       | 19 | Vakuumpumpe                   |
| 8  | beheizte Komponentenleitungen   | 20 | Harzfall (Unterdruckbehälter) |
| 9  | Rezirkulationsleitungen A und B | 21 | obere Werkzeughälfte          |
| 10 | Spülmittelleitungen             | 22 | Werkzeugkavität               |
| 11 | Drei-Wege-Kugelhahnventile      | 23 | untere Werkzeughälfte         |
| 12 | Mischkopf                       | 24 | Wechselrahmen                 |

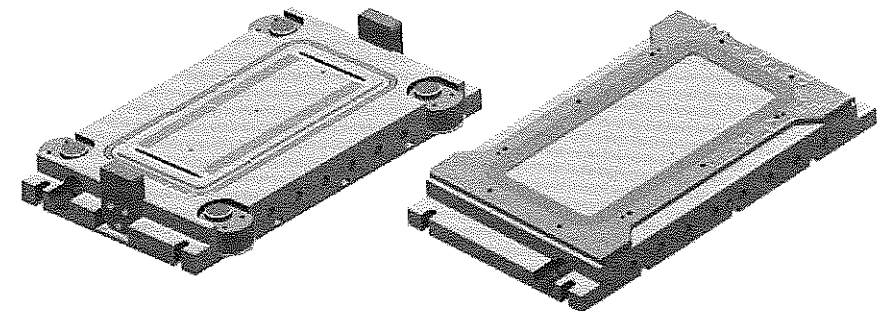
Abbildung 3.4: RTM-Versuchsaufbau in schematischer Darstellung

### 3.2.1 RTM-Versuchswerkzeug

In der frühen Phase dieser Arbeit wurde ein spezielles RTM-Werkzeug zur Herstellung von Musterplatten für Oberflächenuntersuchungen konstruiert und hergestellt. Zur Realisierung hochwertiger Bauteiloberflächen wurde das Versuchswerkzeug wie ein Serienwerkzeug in Werkzeugstahl ausgeführt und verchromt. Da der injizierte Kunststoff im Aushärtungsprozess die Werkzeughälfte exakt abbildet, wurde die Kavitätsoberfläche im RTM-Werkzeug in höchster Oberflächengüte geschliffen und poliert. Einige Details des RTM-Plattenwerkzeugs sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die beiden Hälften dieses RTM-Versuchswerkzeugs sind als CAD-Modell in Abbildung 3.5 dargestellt. In Abbildung 3.6 ist das Werkzeug im eingebauten und betriebsbereiten Zustand gezeigt.

Tabelle 3.1: Angaben zum RTM-Versuchswerkzeug

Detail	Ausführung
Material	Kunststoff-Formenstahl 1.2738, DIN-Bezeichnung 40 CrMnNiMo 8 6 4
Kavitätsgröße	300mm x 700mm, Ecken abgerundet
Kavitätsdicke	Separate Wechselrahmen mit Tauchkante auf unterer WZ-Hälfte für Kavitätsdicken von 1,0 bis 15,0 mm
Oberflächenqualität	N1 – N2, poliert, Verchromung in ATC (Armoly Technology Coating) Dünnschicht-Technologie (ca. 5 µm)
Angüsse / Entlüftung	im Oberwerkzeug: 4 Linienangüsse, 1 Zentralanguss, durch Einsätze wahlweise verschließbar, Angüsse und Entlüftungen gleich ausgeführt
Anguss / Entlüftungskanal	Linienanguss, Abstand von Stirnwand 50mm; mit Kugelfräser Durchmesser 10mm und Entformschräge 3°
Zugänglichkeit	Angüsse und Entlüftungen von oben zugänglich; ausgeführt als Einsätze, die ausgetauscht und ggf. ausgebohrt werden können
Abdichtung / Dichtigkeit	über umlaufende Profildichtung, in Dichtungsnut in oberer Werkzeughälfte kann Spaltmaß von 1mm auffangen (Nachpressen); Werkzeug vakuumfähig, alle Einsätze vakuumdicht
Tauchkanten	Höhe 10mm; Entformschräge 3°, Tauchkante flammgehärtet
Nachpressen mit definiertem Schließspalt	4 Hydraulikzylinder in oberer Werkzeughälfte mit definierter, ausgeführer Position zum Aufhalten des Werkzeugs um 0 bis 2mm, durch Lehrenbleche exakt einstellbar
Zentrierung	Grob- und Feinzentrierung über zwei Führungsbronzen am WZ
Beheizung	RT - 150°C, Heizrate (bzw. Kühlrate) für Heizphasen < 60 min, mit Öl (oder Wasser), durchgehende Bohrungen mit Verteilersystem
Druck	0-10 bar Injektionsdruck, bis zu 150 bar Nachpressdruck
Temperatursensoren	3 Thermolemente im Oberwerkzeug neben Drucksensoren, 2 im Unterwerkzeug, hinter Kavitätsoberfläche in Sacklöchern
Drucksensoren	3 piezoresistive Drucksensoren im Oberwerkzeug in gleichen Abständen, auf Mittelachse, in Einsätzen an Kavitätsoberfläche



Obere Werkzeughälfte

Untere Werkzeughälfte

Abbildung 3.5: RTM-Werkzeug für Oberflächenuntersuchungen (CAD-Modell)

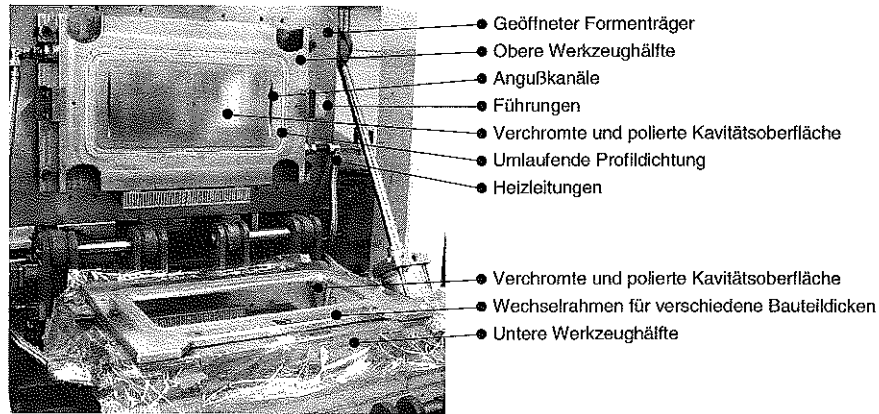


Abbildung 3.6: RTM-Werkzeug im Einsatz auf dem Formenträger

### 3.2.2 Schließeinheit

Zum Öffnen, Schließen und Zuhalten des RTM-Werkzeugs kam bei den RTM-Versuchen mit geringen Injektions- und Nachdrücken ein Formenträger zum Einsatz, der in Abbildung 3.7 dargestellt ist. Hier liegt die untere Werkzeughälfte auf einer Grundplatte, die zum Schließen des Werkzeugs über Luftkissen angehoben wird. Über die Regelung des Luftdrucks kann die Schließkraft des RTM-Werkzeugs eingestellt werden. Der Formenträger bildet einen geschlossenen Rahmen um das Werkzeug, der über eine Gelenkachse auf der Rückseite in einer Klappbewegung um 90° nach hinten geöffnet werden kann. Die Anguss und Entlüftungsstellen des Werkzeugs sind zwischen den Profilträgern an der Oberseite des Formenträgers angeordnet und somit gut zugänglich.

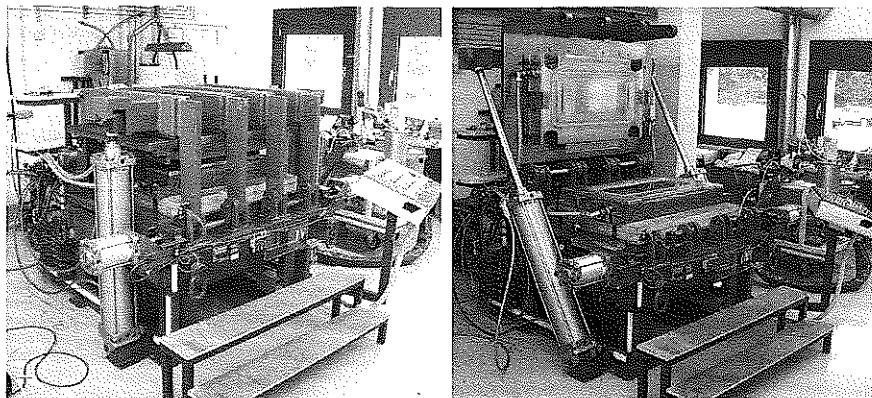


Abbildung 3.7: RTM-Formenträger geschlossen und offen

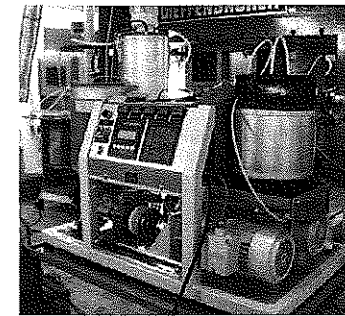
Aufgrund der maximalen Belastbarkeit der Luftkissen konnten mit diesem Formenträger nur begrenzte Forminnendrucke bis 13 bar erzeugt werden. Um Drücke von über 100 bar im Werkzeug zu erreichen, wurde eine parallelgeregelt Bauteilpresse zur GMT-, LFT- und SMC-Verarbeitung mit 800 to Schließkraft eingesetzt.

### 3.2.3 Injektionsanlage

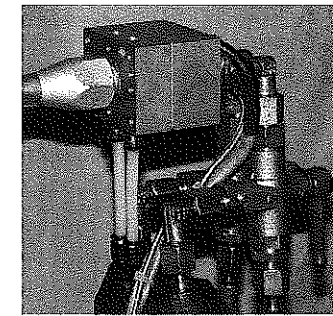
Die größte Anzahl der Versuche wurde mit einer Zweikomponenten-Misch- und Dosieranlage mit SPS-Steuerung, Zahnradpumpen und statischer Mischung durchgeführt. Diese Anlage bietet einige Merkmale, die zur Durchführung von reproduzierbaren RTM-Versuchen im Technikumsmaßstab von Vorteil sind. Dabei sind neben einfacher Bedienung und Handhabung vor allem exakte Umsetzung der Parametervorgaben und Flexibilität gefordert. Einige vorteilhafte Merkmale der eingesetzten Injektionsanlage sind:

- SPS-Steuerung für einfache Programmierung und Bedienung der Anlage, digitale Anzeige der Injektionsparameter
- manuelle oder automatische Steuerung des Injektionsvorgangs nach verschiedenen Vorgaben (Schusszeit, Schussmenge, Komponentendrucke)
- Temperierung von Komponentenbehältern, Komponentenschläuchen und Mischkopf
- ständige Rezirkulation beider Komponenten
- Präzisions-Zahnradpumpen für exaktes Mischverhältnis, somit auch stabiles Mischverhältnis für einen weiten Drehzahlbereich
- Drucksensoren in beiden Komponentenleitungen
- Möglichkeit der druckabhängigen Regelung der Pumpendrehzahlen
- einfacher Komponentenwechsel durch gute Zugänglichkeit der Behälter
- einfacher und robuster Mischkopf mit Statikmischer und Rückschlagventilen
- einfache Reinigung des Mischkopfes und Statikmischers durch Spülen mit Reinigungsmittel und Druckluft

Diese Injektionsanlage für Technikum-Anwendungen ist Abbildung 3.8 dargestellt.



Vorderseite mit Bedienfeld, Spülmittelbehälter und E-Motoren



Mischkopf mit Statikmischer und Komponentenleitungen

Abbildung 3.8: Injektionsanlage zur Epoxidharz-Verarbeitung

## 4 Materialoptimierung zur Verbesserung der Oberflächenqualität

### 4.1 Vorgaben und Randbedingungen

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchungen war aufgrund der Vielzahl der möglichen einsetzbaren Materialien eine Eingrenzung notwendig. So wurden durch bestimmte Anforderungen an die Steifigkeit und Festigkeit schon Randbedingungen für den Lagenaufbau mit der notwendigen Faserverstärkung und die Bauteildicke generiert. Weitere Randbedingungen für eine erste Eingrenzung wurden durch die fertigungstechnische Serientauglichkeit und Wirtschaftlichkeit vorgegeben, z.B. durch Zykluszeit und Halbzeugpreise.

Die Untersuchungen fanden entsprechend der Aufgabenstellung mit dem Ziel statt, Hochleistungs-FVK in der Fahrzeugaußenhaut mit strukturellen Anforderungen (z.B. in Klappen und Dächern) einzusetzen. Es wurde daher ein Lagenaufbau mit aktuellem Bezug auf ein Entwicklungsprojekt ausgewählt. Die hier zu entwickelnde Frontklappe in CFK hatte definierte Anforderungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und des Gewichts. Für diesen grundlegenden Lagenaufbau ergaben sich aus den mechanischen Anforderungen und Gründen der Wirtschaftlichkeit einige Merkmale, die in Tabelle 4.1 aufgeführt sind.

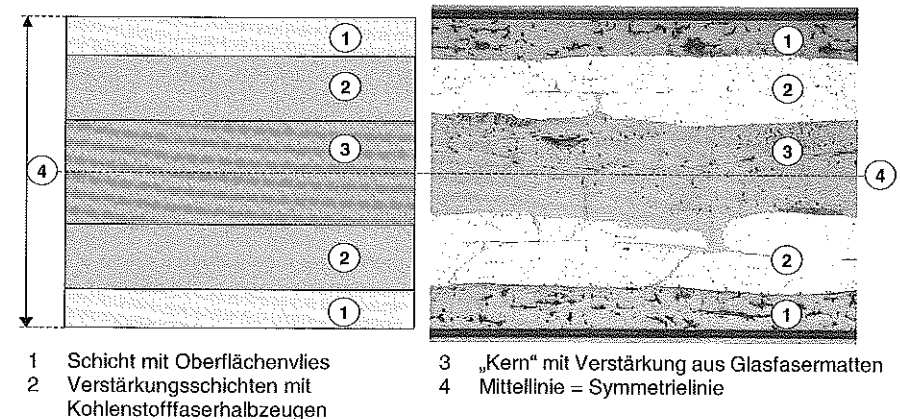
**Tabelle 4.1:** Anforderungen und Merkmale des Lagenaufbaus

Forderung	Merkmale
Schubsteifigkeit	Hauptverstärkung in $+45^\circ/-45^\circ$ Verwendung von Kohlenstofffaser
Beulsteifigkeit	Verstärkung in $0^\circ/90^\circ$ möglichst große Dicke Verstärkungslagen außen
Bauteilfestigkeit	hohe Festigkeit in den Scharnier- und Schlossbereichen Verwendung von Kohlenstofffaser
geringes Gewicht	möglichst geringe Dicke geringer Materialeinsatz (Matrix und Faserverstärkung) Verwendung von Kohlenstofffaser
Wirtschaftlichkeit	geringer Materialeinsatz Verwendung von Glasfaserhalbzeugen kurze Zykluszeiten (schnelle Injektion)

In einem Kompromiss der Anforderungen wurde ein Lagenaufbau ausgewählt, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Wie ein Sandwich-Aufbau besteht dieser aus Einzelschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften, wobei die Hauptverstärkung möglichst weit außen liegt. Bei einer Gesamtdicke von 2 mm kann in diesem Zusammenhang auch von einem „Mikro-Sandwich“ gesprochen werden. Im mittleren Bereich wird ein „Sandwichkern“ mit Glasfaserverstärkung erzeugt, um die Außenschichten mit Kohlenstofffaserverstärkung schubsteif miteinander zu verbinden und nach außen zu drücken. Aus Gründen der Verarbeitbarkeit und Bauteilgenauigkeit ist der Lagenaufbau zur Mittellinie symmetrisch.

An den Bauteiloberflächen befindet sich eine matrixreiche Schicht, die mittels eines Oberflächenvlieses ausgebildet wird und der Verbesserung der Oberflächenqualität dienen soll. In

den Verstärkungsschichten werden Kohlenstofffaserhalbzeuge eingesetzt, die für eine hohe Schubsteifigkeit in  $+45^\circ/-45^\circ$  orientiert sind. Dies ermöglicht die Verwendung von Biaxial-Halbzeugen in bestimmten Flächengewichten, die im Vergleich zu Triaxial- oder Quadriaxial-Halbzeugen kostengünstiger und leichter zu verarbeiten sind. Im Kern kommen Textilglasmaten zum Einsatz, die eine Schicht mit niedrigem Faservolumengehalt und somit niedriger Dichte ausbilden. Diese Schicht dient im RTM-Verfahren zusätzlich als Fließschicht mit stark erhöhter Permeabilität.



**Abbildung 4.1:** Schematische Darstellung und Schlibbild des Grund-Lagenaufbaus

Die Bauteildicke von 2 mm wurde bei diesem Lagenaufbau so gewählt, dass noch Spielraum für den Einsatz verschiedenster Halbzeuge, z.B. als Oberflächenvliese an den Bauteiloberflächen, bleibt. Aus Gründen der Vielseitigkeit bietet dieser Aufbau also noch Gewichtseinsparungspotenzial, sobald die optimalen Materialien ausgewählt sind.

Die Steifigkeitskennwerte für diesen Lagenaufbau, nach der klassischen Laminat-Theorie berechnet und an Musterplatten nachgewiesen, liegen in der Größenordnung der in Tabelle 4.2 angegebenen Werte. Dabei darf der niedrige E-Modul in x- und y-Richtung nicht darüber hinwegtäuschen, dass in  $+45^\circ$ -Richtung eine hochgradige Verstärkung vorliegt, die sich in dieser Darstellung nur im Schubmodul auswirkt.

**Tabelle 4.2:** Mindest-Eigenschaften des Grund-Lagenaufbaus

Ingenieurkonstanten bei Scheibenbelastung (Zug, Schub)					
$E_x^0$	15.000 MPa	$E_y^0$	15.000 MPa	$G_{xy}^0$	22.000 MPa
Ingenieurkonstanten bei Plattenbelastung (Biegung, Torsion)					
$E_x^I$	13.000 MPa	$E_y^I$	13.000 MPa	$E_{xy}^I$	19.000 MPa



## 4.2 Matrixsystem

Für das RTM-Verfahren kommen duroplastische Matrixsysteme zum Einsatz, die aufgrund ihrer geringen Viskosität bei Prozesstemperaturen zwischen Raumtemperatur und 150 °C verarbeitbar sind. Diese Matrixwerkstoffe, ihre Verarbeitung und ihre Eigenschaften, sind ausführlich in der Fachliteratur beschrieben (siehe [29], [33], [39] und [107]).

Duomere werden aus verschiedenen flüssigen oder verflüssigbaren Vorprodukten hergestellt, die, sobald miteinander vermischt, in einem Aushärtungsprozess chemisch reagieren und dreidimensionale amorphe Vernetzungen eingehen. Die für die FVK interessanten duroplastischen Werkstoffe unterteilen sich nach der Art der Reaktionsmechanismen, was auch grundlegende Unterschiede in Verarbeitung und Eigenschaften bedeutet [53]. So umfasst die Gruppe der Polymerisationsharze alle Duomere, die durch radikalische Polymerisation schnell aushärten. Dazu zählen ungesättigte Polyesterharze (UP), Vinylesterharze (VE) und ähnliche doppelbindungshaltige Systeme. Die Gruppe der Polykondensations- und Polyadditionsharze beinhaltet Duomere, die durch schrittweise Reaktion ihrer funktionalen Gruppen aushärten. Hierbei werden meist bessere mechanische und thermische Eigenschaften erzielt als bei der Polymerisationshärtung. Epoxide (EP), Phenolharze (PF), Bismaleinimide (BI) und Polyimide (PI) fallen unter diese Kategorie.

### 4.2.1 EP-Harzsysteme

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Epoxidharze als Matrixwerkstoff untersucht. Gründe hierfür sind vor allem die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die Emissionsfreiheit aufgrund der Vernetzung durch Polyaddition. Neben den Epoxidharzen sind weitere interessante Matrixsysteme für RTM-Außenhautbauteile z.B. Acrylatharzsysteme und VE-EP-Hybridharzsysteme (Vinylester-Epoxy). Der höhere Materialpreis für EP-Harzsysteme rechtfertigt sich durch den Einsatz hochwertiger, allerdings auch teurer Verstärkungshalbzeuge aus Kohlenstofffaser zur Umsetzung des Leichtbaupotenzials. Die Materialkosten für solche Außenhautbauteile aus CFK werden überwiegend durch die Verstärkungsmaterialien verursacht.

Die Eigenschaften, Zusammensetzung, chemischen Reaktionen und Besonderheiten der Epoxidharzsysteme werden in [34], [29], [4] und [113] eingehend beschrieben. In zahlreichen Fachartikeln finden sich Untersuchungen zum Härungsverlauf (siehe [31], [116], [114]), der Modellierung der Aushärtung (siehe [63]) und den physikalischen und chemischen Eigenschaften (siehe [31], [44]). Die Haupteigenschaften der Epoxidharze sind (nach [29]):

- hohe Festigkeit bei statischer und schwingender Beanspruchung
- hohe Formbeständigkeit in der Wärme und Wärmestandfestigkeit
- Viskosität und Reaktivität durch Harz-, Härter-, und Additivauswahl beeinflussbar
- günstiges Alterungsverhalten
- geringe Schwindung
- geringe Neigung zur Spannungsrisbildung
- gute Haftung auf nahezu allen Werkstoffen

- keine Abspaltung niedermolekularer Reaktionsprodukte, geringe Mikroporosität
- hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien
- geringe Brennbarkeit der Standard-Reaktionsharze

Die Epoxidharze sind Verbindungen, die eine oder mehrere reaktionsfähige endständige Epoxidgruppen und mittelständige Hydroxylgruppen haben. Die gebräuchlichsten EP-Harze sind zum größten Anteil Umsetzungsprodukte von Bisphenol A (BPA) und Epichlorhydrin (ECH) und werden als Bisphenol-A-Harze bezeichnet. Bei der Herstellung bilden sich lineare Diglycidyl-Bisphenol-A-Ether, deren Moleküllänge mit fortschreitender Reaktion von  $n=1$  bis  $n>10$  anwächst. Diese EP-Harze sind bifunktional, haben also zwei Epoxidgruppen pro Molekül. Mittelständig befinden sich  $n$  Hydroxylgruppen am Molekül. Mit zunehmender Moleküllänge (Wiederholungsfaktor  $n$ ) verändert sich das EP-Harz von einer niederviskosen Flüssigkeit zu einem hochschmelzenden Feststoff.

Die Eigenschaften der vernetzten Epoxidharze variieren sehr stark mit der Art der oben genannten Präpolymere sowie des verwendeten Härters. Da die reaktiven Epoxid- und Hydroxylgruppen mit vielen anderen chemischen Gruppen reagieren können, kommen zahlreiche Stoffe zur Härtung von EP-Harzen in Frage. Je nach Einsatzgebiet werden Epoxidharzsysteme z.B. mit aliphatischen polyfunktionellen Aminen, Anhydriden oder aromatischen Aminen gehärtet. Die chemischen Strukturen dieser Härter und die aus ihnen resultierenden Vernetzungsreaktionen sind vielfältig. Dies bedingt Unterschiede in den Reaktionsgeschwindigkeiten, der Exothermie und auch in den Eigenschaften des gebildeten Vernetzungsproduktes. Zudem können noch Verdüner, Flexibilisatoren, Farbstoffe und Füllstoffe eingesetzt werden, um die Eigenschaften des EP-Systems vor, während und nach der Reaktion zu verändern. Mit dem Reaktionsfortschritt, also mit zunehmender Vernetzungsdichte, steigen vor allem Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit. Mit erhöhter Reaktionstemperatur werden alle Vernetzungsreaktionen beschleunigt, d.h. die Härterzeit verkürzt.

Nach dem Mischen von Harz und Härter beginnt die Bildung des Makromoleküls. Die wichtigste Härtungsreaktion der Epoxidharze ist die Polyaddition mit einem Reaktionsmittel, dem Härter. Je höherfunktionaler der Härter ist, desto mehr endständige Epoxidgruppen kann er an sich binden, und desto dichter ist die Vernetzung. Diese Vernetzungsreaktion ist durch zwei Hauptmerkmale gekennzeichnet, durch die Exothermie und den Viskositätsanstieg.

Die Exothermie beschreibt die Wärmeentwicklung bei der Reaktion von Harz und Härter. Die exotherme Reaktion bewirkt eine Temperaturerhöhung des bereits gemischten und reagierenden Harz-Härter-Systems. Die Wärmeentwicklung hängt stark ab von der Masse des reagierenden Systems (der Dicke des Bauteils oder des Volumens des Mischgefäßes) und die Temperaturerhöhung von der Möglichkeit, diese Wärme abzuleiten. So kann bei ausreichender Masseanhäufung und schlecht wärmeleitender Werkzeugwandung leicht die Zersetzungstemperatur von über 250°C erreicht werden.

Der Viskositätsanstieg beschreibt die zunehmende Vernetzung des EP-Systems bei der Reaktion. Zum Viskositätsverlauf tragen zwei gegenläufige Effekte bei:

- Erhöhung der Viskosität aufgrund der Bildung des Makromoleküls
- Erniedrigung der Viskosität aufgrund der Temperaturerhöhung in Folge der exothermen Vernetzungsreaktion

Für die Verarbeitung im RTM-Verfahren werden niederviskose Harzsysteme gewählt, um die ins Werkzeug eingelegte Faserverstärkung während der Harzinjektion leicht und schnell tränken zu können. Um die Viskosität zu verringern, wird das Harz über Komponentenbehälter, Komponentenschläuche und Mischkopf vorgeheizt. Für eine schnelle Injektion und eine beschleunigte Reaktion ist das Werkzeug ebenfalls temperiert. In Abbildung 4.2 sind der ideale und der reale Viskositätsverlauf für eine isotherme und eine nicht-isotherme Reaktion dargestellt. Für das RTM-Verfahren ist eine möglichst niedrige Viskosität bis zum Gelierpunkt günstig. Somit kann in diesem Zeitraum in kürzestmöglicher Zeit injiziert werden. Direkt nach der Injektion soll der maximale Viskositätsanstieg und die vollständige Aushärtung in kurzer Zeit stattfinden.

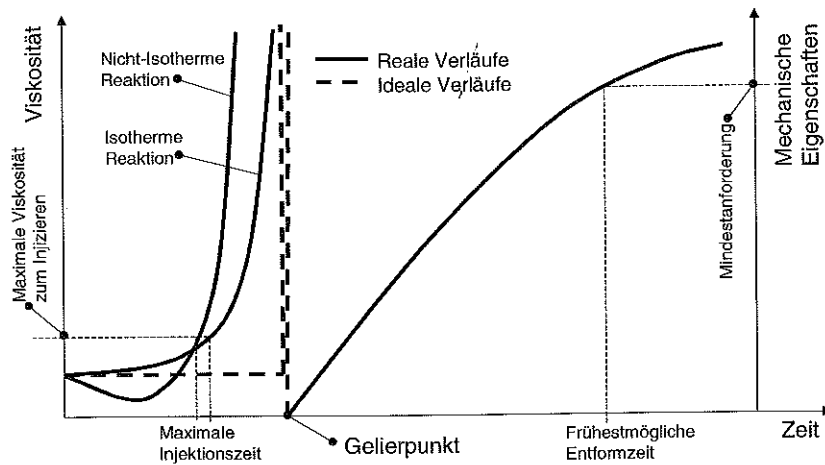


Abbildung 4.2: Idealer und realer Viskositätsverlauf bei der Aushärtung

Die EP-Harze durchlaufen wie alle duroplastischen Systeme bei der Aushärtung im Wesentlichen drei morphologische Zustände: flüssig, gelartig und fest (siehe auch [31] und [116]). Die Übergänge zwischen diesen Zuständen sind jeweils durch Veränderungen der thermomechanischen Eigenschaften des Harzsystems gekennzeichnet. Der Übergang vom flüssigen in den gelartigen Zustand, der sogenannte Gelpunkt, ist mit einem so starken Viskositätsanstieg gekennzeichnet, dass das Harzsystem nicht mehr fließt und nicht weiter verarbeitbar ist. Am Übergang vom gelartigen in den festen Zustand, dem sogenannten Glasübergang, erreicht die Glasübergangstemperatur  $T_g$  des Harzsystems die Verarbeitungstemperatur  $T_v$ . Da das Harzsystem hier vom gummielastischen in den hartelastischen und meist spröden Zustand wechselt,

ist der Glasübergang mit einem starken Steifigkeitssprung verbunden. Zudem wird die Reaktion oberhalb des Glasübergangs diffusionsgesteuert. Sie „friert“ sozusagen ein, und die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt drastisch. Die vollständige Aushärtung mit Umsetzung aller Reaktanden wird nicht erreicht. Das Harzsystem wird bei Gebrauchstemperaturen unterhalb seines  $T_g$  in diesem glasartigen Zustand bleiben. Bei Überschreiten des  $T_g$  wird es hingegen wieder in den gelartigen Zustand übergehen.

Diese drei morphologischen Zustände können in Abhängigkeit der Zeit und der Temperatur noch weiter in insgesamt sieben Bereiche eingeteilt werden:

- glasartig, vollständig ungehärtet
- flüssig
- gelartig
- gelartig, gummielastisch
- glasartig, jedoch nicht vollständig ausgehärtet
- glasartig, vollständig ausgehärtet
- abgebaut

Diese sind im Time-Temperature-Transition (TTT)-Diagramm in Abbildung 4.3 beispielhaft dargestellt [116]. Die isotherme Aushärtung eines Harzsystems bei der Verarbeitungstemperatur  $T_v$  erfolgt in diesem TTT-Diagramm entlang einer waagerechten Linie zwischen dem maximal erreichbaren  $T_g$  des Systems, gekennzeichnet mit  $T_{g,max}$ , und der Glasübergangstemperatur des vollständig ungehärteten Harzes  $T_{g,0}$ .

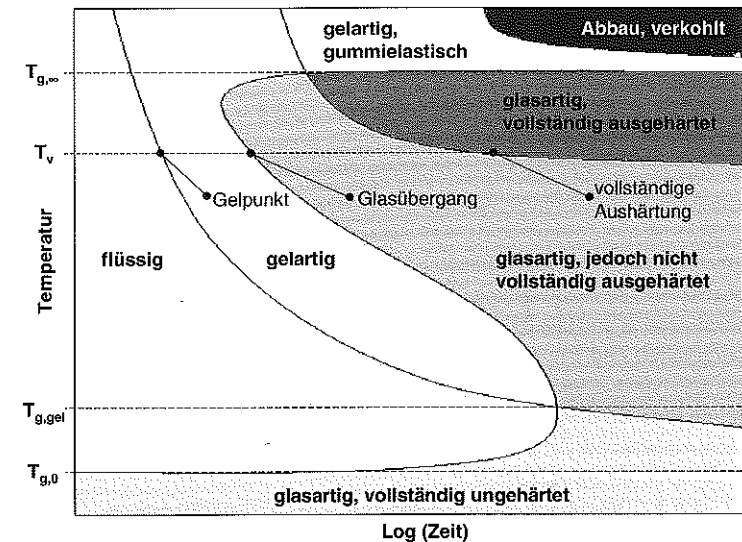


Abbildung 4.3: TTT-Diagramm eines duromeren Harzsystems [116]

Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Gelierlinie kennzeichnet den Gelpunkt, der Schnittpunkt mit der Glasübergangskurve den Glasübergang. Bei ausreichend hoher Verarbeitungstemperatur kann es nach gewisser Zeit zur vollständigen Aushärtung kommen. Dies ist allerdings nur in einem vom Harzsystem abhängigen Temperaturbereich möglich. Zu hohe Temperaturen führen zum thermischen Abbau, zu niedrige verhindern eine vollständige Aushärtung.

#### 4.2.2 Auswahlkriterien für EP-Harze

In einem ersten Schritt war eine Vorauswahl aus der Vielzahl der Epoxidharzsysteme notwendig, die am Markt erhältlich sind oder als Versuchsprodukte angeboten werden. Daher wurden folgende Anforderungen an das Matrixsystem für die Verwendung in einem serientauglichen RTM-Prozess zur Herstellung von Außenhautbauteilen festgelegt:

Für eine kurze Zykluszeit (Injektion und Aushärtung):

- möglichst niedrige Anfangsviskosität (< 50 bis 100 mPas bei Harztemperatur 60-100°C)
- ca. 60-90 sec maximale Injektionszeit
- definierter Viskositätsverlauf (lange niedrig, dann sehr steiler Anstieg)
- möglichst schnelles Harz-Härter-System mit hoher Reaktivität
- hoher  $T_g$  nach kurzer Aushärtezeit (< 15 min, Perspektive auf < 8 min)
- Ziel  $T_g > 100^\circ\text{C}$  nach kurzer Aushärtung (wegen Einsatztemperatur)
- Verarbeitungstemperatur bei 60-100°C

Für eine hohe Oberflächenqualität:

- möglichst niedrige Reaktionsschwindigkeit (chemische Schwindung)
- möglichst niedrige thermische Schwindung, deshalb niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient, niedrige Verarbeitungstemperatur
- Porenfreiheit des ausgehärteten Systems
- möglichst keine Alterung, Nachhärtung, Nachschwindung
- nach Aushärtung Beständigkeit gegen Temperaturbelastung, Chemikalien...

Weiterhin ergeben sich Anforderungen für eine gute Verarbeitbarkeit (keine verbotenen Stoffe, Besonderheiten bei Handhabung, Korrosionsverhalten, Verträglichkeit mit Anlagentechnik, Flammverhalten...) und aus der Wirtschaftlichkeit (niedriger Preis für Harz und Härter, Entwicklungsbereitschaft und Know-how bei Lieferant...). Diese Anforderungsliste an die EP-Harzsysteme beinhaltet Ziele, die zum Teil gegenläufig sind und nicht gleichzeitig erfüllt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit hatten die Anforderungen nach kurzer Zykluszeit und hoher Oberflächenqualität bei der ersten Betrachtung und Auswahl die höchste Bedeutung.

#### 4.2.3 Vergleich verschiedener hochreaktiver EP-Harze

Anhand der Kriterien des Lastenheftes für das EP-System wurden gemeinsam mit verschiedenen Harzherstellern Lösungsansätze gesucht und potentielle Kandidaten ausgewählt. Hierzu

steuerten die vier EP-Harzhersteller Shell Chemicals, Dow Chemicals, Ciba Spezialitätenchemie und Bakelite Vorschläge bei und lieferten Mustermengen von teilweise in Produktion, teilweise in Entwicklung befindlichen EP-Harzsystemen. Aus den Vorschlägen zu verschiedenen Bisphenol-A-Harzen und verschiedenen Härtern wurden in Voruntersuchungen vier Kombinationen ausgesucht, welche die Anforderungen an die Anfangsviskosität und die Reaktivität erfüllen. Diese Vorauswahl ist in Tabelle 4.3 dargestellt mit den charakteristischen Merkmalen der Harz-Härter-Kombinationen, wie z.B. die Gelierzeit bei 80°C als Richtwert für die Reaktivität.

Tabelle 4.3: Untersuchte EP-Harzsysteme von vier verschiedenen Herstellern

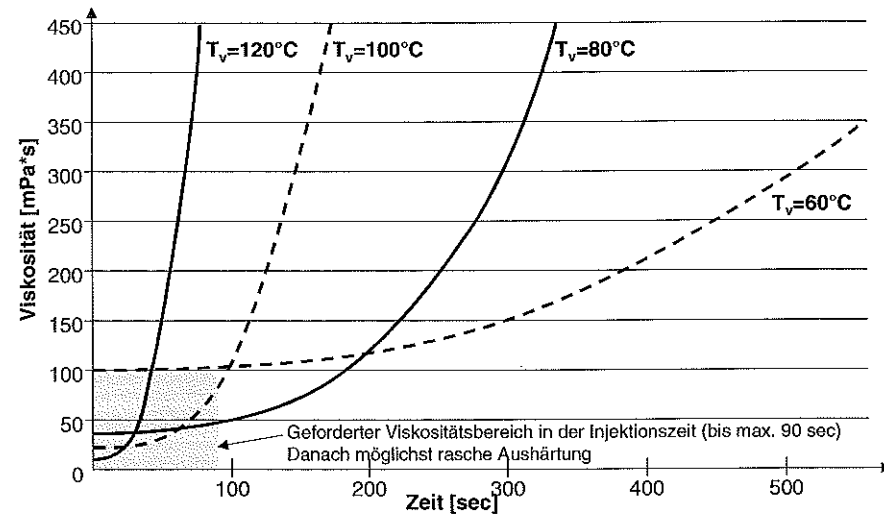
Harzsystem	Härter (*beschleunigt)	EP-System	Mischverhältnis (nach Masse) Herstellerangabe	Gemessene Dichte Harz / Härter bei 20°C in g/cm <sup>3</sup>	Mischviskosität bei 60°C / 80°C in mPas Herstellerangabe	Gelierzeit bei 80°C in min Herstellerangabe
A	1 *	A1	100:17,5	1,165 / 0,958	34 / 20	8
B	2 *	B2	100:19	1,162 / 1,040	118 / 52	5,5
B	3	B3	100:14	1,162 / 0,979	112 / 48	7
C	4	C4	100:24	1,158 / 0,961	100 / 30	6
D	5	D5	100:26	1,162 / 0,954	98 / 30	4,5

Für die geforderte hohe Reaktivität kommen bei den aufgeführten Systemen aminische Härter der folgenden Typen zum Einsatz:

- Cyclohex-1,2-ylendiamin
- Isophorondiamin (IPD)
- Triethylentetramin (TETA)
- Diethylentriamin (DETA)

#### 4.2.3.1 Viskositätsverläufe

Beispielhaft sind in Abbildung 4.4 die Viskositätsverläufe für verschiedene Temperaturen für das Harzsystem C4 gezeigt. Im Laborversuch an Reinharzproben zeigt sich die unterschiedliche Anfangsviskosität bei verschiedenen Verarbeitungstemperaturen, sowie der unterschiedlich schnelle Viskositätsanstieg aufgrund der Vernetzungsreaktion. Die Anforderung nach niedriger Viskosität während einer Injektionszeit von 60-90 sec und gleichzeitig möglichst rascher Aushärtung wird von diesem Harzsystem im Laborversuch bei 100°C am besten erfüllt. Die Vernetzungsreaktion bei 120°C läuft in diesem Fall so schnell ab, dass nur für etwa 40 sec die Viskosität <100 mPas liegt und die Gelierung des Harzsystems bei <90 sec stattfindet.



**Abbildung 4.4:** Viskositätsverläufe bei  $T_v = 60^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  und  $120^\circ\text{C}$  für das Harzsystem C4 bei isothermer Versuchsdurchführung

Die fünf ausgewählten Harz-Härter-Kombinationen erfüllen alle die Forderungen an die niedrige Anfangsviskosität und den Viskositätsverlauf bei verschiedenen Verarbeitungstemperaturen. Bei vorgegebener Permeabilität der Faserverstärkung ermöglicht eine niedrige Anfangsviskosität eine schnelle Infiltration der Faserhalbzeuge. Kurze Füllzeiten wiederum erlauben es, die Werkzeugtemperatur zur schnelleren Aushärtung weiter zu erhöhen und die Zykluszeit insgesamt zu verkürzen. Dabei findet der Viskositätsanstieg durch die schnellere Vernetzungsreaktion früher statt. Die Grenze der Prozesszeitverkürzung durch Steigern der Verarbeitungstemperatur ist dann erreicht, wenn der Viskositätsanstieg des Harzsystems zum Ende der Injektionszeit die vollständige Kavitätsfüllung erschwert oder verhindert.

#### 4.2.3.2 Reaktivität und Glasübergangstemperaturen

Für eine kurze Zykluszeit des RTM-Prozesses ist eine hohe Reaktivität mit schneller Aushärtung gefordert. Während die Gelierzeit nur ein erster Anhaltspunkt sein kann, ist eine gute Messgröße für die Reaktivität die Glasübergangstemperatur  $T_g$ , die bei der konstanten Aushärtetemperatur innerhalb einer bestimmten Aushärtezeit erreicht werden kann. Weiterhin beschreibt die frühestmögliche Entformzeit den Zeitpunkt, an welchem das EP-System während der Aushärtung den Glasübergang durchläuft. Als Faustregel kann hier gelten: Die minimale Entformzeit bei konstanter Werkzeugtemperatur beträgt ca. das Fünffache der Gelierzeit. Erst dann erreicht das Bauteil die erforderliche Entformungssteifigkeit und Formstabilität. Diese Stabilität gilt allerdings nur für Temperaturen unterhalb der Verarbeitungstemperatur. Für höhere Temperaturbeständigkeit für die Gebrauchstemperaturen ist ein höherer  $T_g$  erforderlich, was eine längere Aushärtung erfordert.

Das unterschiedliche Aushärteverhalten der verschiedenen EP-Harzsysteme wurde anhand von  $T_g$ -Bestimmungen mittels Differential Scanning Calorimetry (Dynamische Differenzkalorimetrie, DSC) untersucht. Bei der DSC werden Reinharz-Proben mit definierter Aushärtungsgeschichte kontrolliert in einem Probenziegel erhitzt und die dabei aufgenommene bzw. abgegebene Wärme gemessen. Der Verlauf der Reaktionsenthalpie über der ansteigenden Temperatur gibt Aufschluss über die Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Das Temperaturprofil mit Start- und Endtemperatur, die Aufheizrate, die Probengröße und Tiegelform haben Einfluss auf das Messergebnis und müssen auf das zu untersuchende Material abgestimmt sein. Die Ergebnisse sind deshalb nicht absolut, sondern vergleichend zu bewerten. Im gleichen Zuge wurden die maximal erreichbaren Glasübergangstemperaturen,  $T_{g,max}$  oder End- $T_g$ , für die Harz-Härter-Kombinationen ermittelt. In Tabelle 4.4 sind einige Ergebnisse für gemessene End- $T_g$  und  $T_{g,mittel}$  für die fünf Harzsysteme dargestellt. Weitere Aussagen über die tatsächliche Verarbeitbarkeit, die minimale Entformzeit und die an Bauteilen erreichten  $T_g$  stammen aus zahlreichen Bauteilversuchen mit dem RTM-Plattenwerkzeug.

**Tabelle 4.4:** Gemessene Glasübergangstemperaturen der betrachteten EP-Harzsysteme

Harz-Härter-Kombination	End- $T_g$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_g$ [ $^\circ\text{C}$ ] nach 20 min bei $80^\circ\text{C}$	$T_g$ [ $^\circ\text{C}$ ] nach 20 min bei $100^\circ\text{C}$
A1	157,6	87	113
B2	127,3	89	110
B3	129,9	79	102
C4	132,8	78	92
D5	128,1	75	94

Die vorliegenden Ergebnisse sind im RTM-Prozess im Versuchswerkzeug aus Stahl mit der Dicke und Faserverstärkung des Beispiel-Lagenaufbaus ermittelt worden. Der beobachtete Reaktionsverlauf, die auftretende Exothermie und der erreichte  $T_g$  haben deshalb eine hohe Aussagekraft für ein Serienbauteil mit ähnlichen Randbedingungen. Ergebnisse, die im Labor an Reinharzproben und in Probengefäßen ermittelt wurden, können insbesondere für hochreaktive Harzsysteme aufgrund der sehr unterschiedlichen thermodynamischen Randbedingungen schwer interpretiert und auf Bauteilgegebenheiten übertragen werden (z.B. der Einfluss der Faseroberfläche und des Faservolumens auf die Vernetzungsreaktion). Da diese Randbedingungen aber das Aushärteverhalten entscheidend beeinflussen und nur unzureichend erfassbar sind, wurde eine Auswertung der ermittelten Daten über ein mathematisches anstelle eines chemisch-physikalischen Modells durchgeführt.

Mit den gesammelten Daten aus den DSC-Messungen für vier Harzsysteme konnte ein Regressionsmodell für die Abhängigkeit des  $T_g$  von Harzsystem, Aushärtezeit und -temperatur erstellt werden. Dieses vollquadratische Modell (lineare Terme, Wechselwirkung, quadratische Terme) wurde anschließend zur Verbesserung der Aussagefähigkeit auf die erklärbaren Einflüsse reduziert. Diese Vorgehensweise bei der Bildung eines Regressionsmodells ist in Anhang G erläutert und in Kapitel 5.4 ausführlich am Beispiel erklärt. Die mathematischen Modelle für das Aushärteverhalten der Harzsysteme sind in Tabelle 4.5 in Zahlenwerten angegeben.

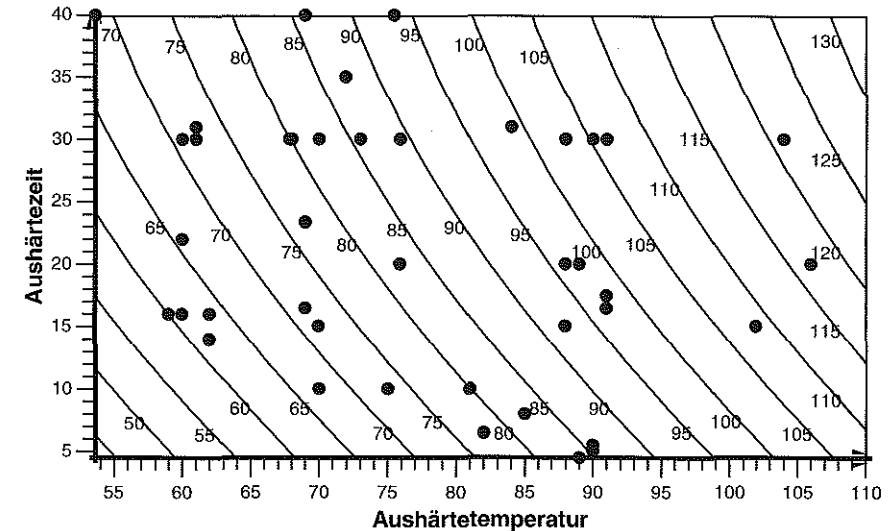
**Tabelle 4.5:** Regressionsmodell für Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) in Abhängigkeit von Aushärtetemperatur ( $WZ\_T$ ) und Aushärzeit ( $E\_Zeit$ )

Harz-Härter-Kombination	Regressionsmodell		Versuchsanzahl
A1	$T_g = -41,67 + 1,322 * WZ\_T + 1,108 * E\_Zeit - 0,008890 * E\_Zeit^2$	Konstante lineare Terme quadratische Terme	16
B2	$T_g = -22,86 + 1,143 * WZ\_T + 1,108 * E\_Zeit - 0,008890 * E\_Zeit^2$		44
B3	---		nicht ausreichend
C4	$T_g = -8,35 + 0,8261 * WZ\_T + 1,108 * E\_Zeit - 0,008890 * E\_Zeit^2$		10
D5	$T_g = 13,35 + 0,6010 * WZ\_T + 1,108 * E\_Zeit - 0,008890 * E\_Zeit^2$		11

Da die Modellqualität und -aussagekraft mit der Anzahl der Experimente zusammenhängt, ist besonders das Modell für das System B2 mit 44 Experimenten sehr gut abgesichert und hat hier enge Vertrauensbereiche. Der Wert für das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches die Übereinstimmung von Gesamtmodell und gemessenen Werten anzeigt, beträgt insgesamt  $R^2 = 94\%$ . Das Modell hat aufgrund der geringeren Versuchsanzahl für die Systeme C4 und D5 weitere Vertrauensbereiche.

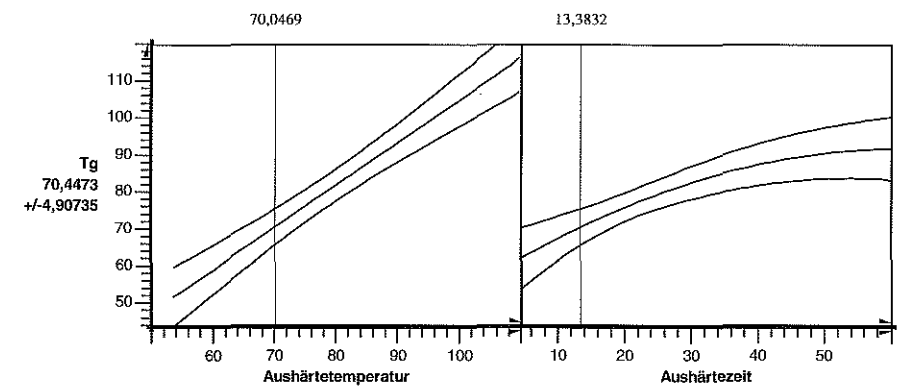
Die Auswertung der Versuchsdaten und des Regressionsmodells führt zu einer anderen Aussage als die erste Betrachtung der Reaktivität über die von den Herstellern angegebenen Gellierzeiten. Die beiden Harzsysteme A1 und B2 haben eine höhere Reaktivität und zeigen somit eine schnellere Aushärtung als die beiden Harzsysteme C4 und D5. Die minimale Entformzeit liegt etwa bei dem Zeitpunkt, zu welchem der  $T_g$  die Aushärtetemperatur erreicht. Bei den Harzsystemen A1 und B2 liegt diese minimale Entformzeit bei niedrigen Aushärtetemperaturen unter 20 min, bei hohen sogar unter 10 Minuten. Mit diesen beiden Harzsystemen sind schon nach kurzen Zeiten Glasübergangstemperaturen höher 100°C möglich. Beim Harzsystem B2 sind im Vergleich zu den anderen Systemen deutlich niedrigere Aushärtetemperaturen notwendig, um kurze Entformzeiten zu erreichen. Die Reaktivität ist schon bei niedrigen Temperaturen so hoch, dass mit einer Verarbeitungstemperatur zwischen 65 bis 90°C minimale Aushärzeiten von 15 bis 9 Minuten erreicht werden können.

Das Höhenlinien-Diagramm in Abbildung 4.5 zeigt diesen Zusammenhang beispielhaft für die Harz-Härter-Kombination B2. Die durchgeführten RTM-Versuche mit anschließender DSC-Messung, welche das Modell stützen, sind als Punkte ins Diagramm eingetragen. Alle Höhenliniendiagramme sind zum Vergleich in Anhang E dargestellt.



**Abbildung 4.5:**  $T_{g, \text{mittel}}$  über Aushärzeit und -temperatur für das Harz-Härter-System B2

Der Zusammenhang zwischen  $T_g$  und Aushärzeit bei einer vorgegebenen Aushärtetemperatur wird hier besonders deutlich. In Abbildung 4.6 ist dieses Verhalten dargestellt, indem die  $T_g$ -Fläche am Punkt für 70 °C und 13,4 min von der Seite in den beiden Ebenenrichtungen für Aushärtetemperatur und -zeit betrachtet wird. Die jeweils mittlere Linie gibt den vom Modell vorhergesagten  $T_g$ -Wert an, die beiden äußeren den Vertrauensbereich mit einer Wahrscheinlichkeit von 95%.



**Abbildung 4.6:**  $T_g$ -Verlauf über Zeit bei Aushärtetemperatur 70°C für System B2

Im dargestellten Beispiel wird bei einer Verarbeitungstemperatur von 70°C nach ca. 13,4 min ein  $T_g$  von ebenfalls 70°C erreicht. Der  $T_g$ -Verlauf zeigt eine Sättigung bei 91°C, was bedeutet, dass selbst bei sehr langer Aushärtung bei 70°C der  $T_g$  nicht weiter steigen wird. Dieses Sättigungsverhalten bei einer Aushärtung zwischen  $T_{g,0}$  und  $T_{g,\infty}$  ist in der Literatur beschrieben (siehe [44], [114], [116]) und resultiert aus der verminderten Mobilität der Einzelmoleküle und dem „Einfrieren“ der Reaktion beim Glasübergang. Im TTT-Diagramm in Abbildung 4.3 wird deutlich, dass nur bei ausreichend hoher Verarbeitungstemperatur vollständig ausgehärtet werden kann. Bei niedrigeren Aushärtetemperaturen wird auch in beliebig langer Aushärtezeit nur der glasartige, nicht vollständig ausgehärtete Zustand mit einer maximal möglichen Konversion der Reaktanden, einem maximalen Vernetzungsgrad  $c_{max}(T_v)$  und maximalem  $T_{g,max}(T_v) < T_{g,\infty}$  erreicht. Die Verarbeitungstemperatur gibt vor, welcher maximale Sättigungs- $T_g$  im Werkzeug erreicht werden kann. Trotz vollquadratischem Modellansatz geht die Aushärte-temperatur aber nur linear in das Modell ein. Deshalb ist der tatsächliche Zusammenhang zwischen dem Sättigungs- $T_g$  und der Werkzeugtemperatur annähernd proportional. Er hängt stark ab sowohl von der Exothermie bei der Reaktion des Harzsystems als auch von den thermodynamischen Randbedingungen in der Kavität. Daher kann er deutlich über der Werkzeugtemperatur liegen; im vorliegenden Fall um 19 bis 23°C. Das mathematische Modell beschreibt hier die beste Näherung des ermittelten Verhaltens und nicht die tatsächlichen chemischen und physikalischen Zusammenhänge, die z.B. über die Gesetze der Reaktionskinetik und Thermodynamik erfasst werden.

Der hier vorgewählte, vollquadratische Modellansatz führt zu einem Prozessmodell mit engen Vertrauensbereichen, welches das Aushärteverhalten der EP-Harzsysteme sehr gut beschreiben kann. Diese Zusammenhänge sind bei den Harzsystemen A1 und B2 mit größerer Versuchsanzahl zu erkennen und für alle EP-Systeme mit gleichen Reaktionsmechanismen zu erwarten. Daher kann bei der Ermittlung des Aushärteverhaltens weiterer EP-Systeme der zukünftige Versuchsaufwand erheblich reduziert werden. Für ein gemischtes linear-quadratisches Modell mit zwei Einfluss und einer Zielgröße entsteht selbst bei vollfaktorieller Versuchsplanung ein Aufwand von nur 6 Versuchen zur Ermittlung der Koeffizienten. Für eine minimale statistische Absicherung dieser Ergebnisse sind noch mindestens 5 Versuche notwendig, was im vorliegenden Beispiel zu einer Aufweitung der Vertrauensbereiche auf etwa die doppelte Breite führt. Weitere Versuche über diese minimale Versuchsanzahl von 11 hinaus tragen aber zum Erkenntnisgewinn durch starke Einengung der Vertrauensbereiche bei. Für Harzsysteme mit anderen Reaktionsmechanismen bietet sich zur Sicherheit die Aufstellung eines vollquadratischen Ansatzes an, was zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit insgesamt 14 Versuchen (statt 11) führt.

#### 4.2.3.3 Oberflächenqualität

Um die verschiedenen Harzsysteme hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenqualität zu vergleichen, wurden Musterplatten hergestellt, die sich nur in der Verarbeitungstemperatur und der Entformzeit unterscheiden. Da die Systeme ein unterschiedliches Aushärteverhalten zeigen, mussten diese beiden Parameter für jedes System optimiert werden. Alle weiteren Einfluss-

größen, wie Verstärkungsstruktur, Oberflächenvlies, Werkzeugoberfläche und weitere Prozessparameter wurden konstant gehalten. Zur Beurteilung der Oberflächenqualität werden die Messwerte für Lang- und Kurzwelligkeit nach der Wave-Scan-Methode von Byk-Gardner herangezogen. Der chemische und thermische Schrumpf während der Verarbeitung und Abkühlung der Musterteile auf RT führt zur Abzeichnung der Verstärkungsstruktur an der Oberfläche (siehe Kapitel 2.4.3). Die Langwelligkeit dieser Musterplatten spiegelt das unterschiedliche Schrumpfverhalten der Harzsysteme wider (siehe Abbildung 4.7). Die Kurzwelligkeit verhält sich gleichermaßen. Das System B3 ist im Vergleich nicht enthalten, da hier nur eine unzureichende Anzahl an Musterplatten hergestellt werden konnte.

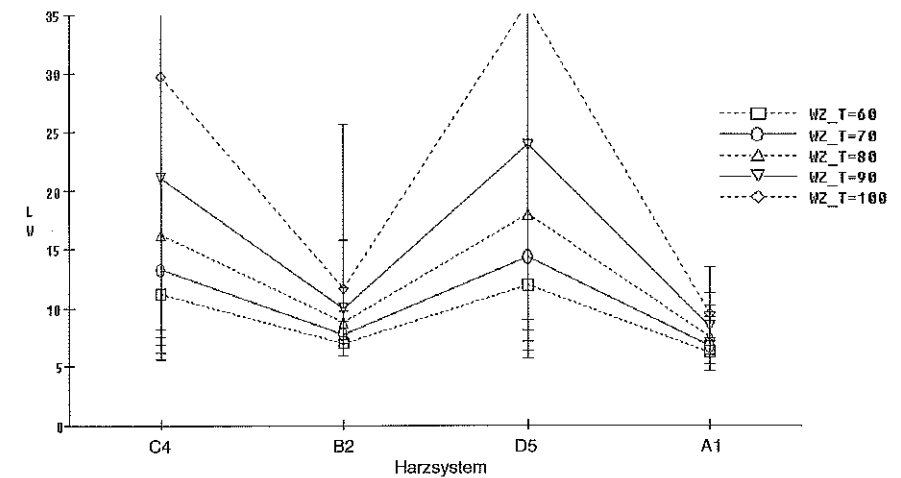


Abbildung 4.7: Langwelligkeit für die vier Harzsysteme bei verschiedenen Temperaturen

Mit den Harzsystemen A1 und B2 können deutlich bessere Oberflächen erzeugt werden als mit den Harzsystemen C4 und D5. Bei der Auswertung ist allerdings zu beachten, dass hier die Oberflächenqualität für gleiche Prozessparameter verglichen wird. Die unterschiedliche Reaktivität der Systeme bleibt dabei unberücksichtigt. Bei einem Vergleich der Systeme nach gleichem erreichten  $T_g$  oder gleicher Aushärtezeit verschiebt sich das Ergebnis zugunsten der reaktiveren Systeme.

Die nach dieser Untersuchung favorisierten Harzsysteme A1 und B2 zeigen ein unterschiedliches Aushärteverhalten. So sind für das Harzsystem A1 zum Realisieren kurzer Zykluszeiten höhere Verarbeitungstemperaturen notwendig als für das Harzsystem B2. Letzteres ist auch bei niedrigen Temperaturen von <80°C so reaktiv, dass bereits nach wenigen Minuten entformt werden kann. Ein Vergleich der Harzsysteme ist z.B. über die minimale Entformzeit möglich, bei der die Glasübergangsstufe des Matrixmaterials die Verarbeitungstemperaturen erreicht. Eine Entformzeit von 15 Minuten z.B. ist für das System A1 bei ca. 95°C Verarbeitungstemperatur möglich, für das System B2 bei ca. 65°C.

Da die Oberflächenqualität für alle Harzsysteme mit steigender Verarbeitungstemperatur abnimmt, scheint eine Verarbeitung bei niedrigeren Temperaturen vorteilhaft. Allerdings darf nicht nur die geringstmögliche Entformzeit als Kriterium gesehen werden. Wichtig zum Vergleich ähnlicher Temperaturbeständigkeit des Bauteils ist der nach der Aushärtung erreichte  $T_g$ . Somit kann die Minimalanforderung an den  $T_g$  für die zwei Harzsysteme bei verschiedenen Verarbeitungstemperatur erfüllt werden.

#### 4.2.4 Fazit

Verschiedene Kombinationen von Epoxidharzen und Härtern wurden hinsichtlich einer kurzen Zykluszeit des RTM-Prozesses und einer hohen Oberflächenqualität des faserverstärkten Bauteils verglichen.

Anhand von RTM-Versuchen mit einem Beispiel-Lagenaufbau von 2mm Dicke wurden die Verarbeitbarkeit und die Reaktivität der Systeme ermittelt. Über die Variation von Aushärtemperatur und -zeit konnte der Zusammenhang zum erreichten  $T_g$  des jeweiligen Systems erfasst und in einem Regressionsmodell mit hohem Bestimmtheitsmaß nachgebildet werden. Dieses neue mathematische Modell mit zwei Einfluss- und einer Zielgröße ermöglicht aufgrund der realitätsnahen Versuchsbedingungen eine Vorhersage des Verhaltens der Harzsysteme im Serien-RTM-Prozess. Weitere EP-Harzsysteme mit ähnlichem Aushärteverhalten können mit wesentlich geringerem Versuchsaufwand (z.B. 16 statt 44) auf die gleiche Weise charakterisiert werden.

Die Oberflächenqualität, gemessen mit dem Wave-Scan-Plus in Lang- und Kurzwelligkeit, zeigt eine starke Abhängigkeit vom Harzsystem. Weiterhin nimmt sie mit steigender Werkzeugtemperatur ab. Mit den Harzsystemen A1 und B2 wird bei allen Verarbeitungstemperaturen eine deutlich höhere Oberflächenqualität erreicht als mit den anderen betrachteten EP-Systemen. Aufgrund der besseren Oberflächenqualität und der Fähigkeit, innerhalb kurzer Aushärtezeiten ausreichend hohe  $T_g$  zu erreichen, werden die Harzsysteme A1 und B2 für die weiteren Untersuchungen als zielführend ausgewählt. Das Harzsystem B2 kann aufgrund einer höheren Reaktivität auch bei niedrigeren Temperaturen schnell verarbeitet werden, was zur Verkürzung der Zykluszeit beiträgt.

### 4.3 Faserverstärkung

Ziel dieser Materialoptimierung ist es, geeignete Faserhalbzeuge zu identifizieren und zu entwickeln, mit welchen eine Class-A-Oberflächenqualität der lackierten RTM-Musterteile erreicht werden kann. Neben einer Erfüllung der geforderten Werte für die Lang- und Kurzwelligkeit ( $LW < 8$ ,  $SW < 35$  für horizontale Bauteile;  $LW < 26$ ,  $SW < 35$  für vertikale Bauteile) sollen die regelmäßigen Strukturen an der Oberfläche soweit reduziert werden, dass sie bei der optischen Beurteilung nicht beanstandet werden. Als Referenz für die geforderte Oberflächenqualität dient die in Kapitel 2.4.5 vorgestellte Oberfläche des Stahlschiebedaches (Profilometer-Bilder in Abbildung 2.18).

Das Faserdurchzeichnen stellt ein Hauptproblem für die Oberflächenqualität kontinuierlich verstärkter Faserverbundwerkstoffe dar. Die Ursache liegt im inhomogenen Aufbau des Werkstoffs, welcher durch die Verarbeitungsschwindung der Matrix während des Herstellprozesses zur Ausbildung einer Oberflächenstruktur führt. Die beiden Hauptbestandteile des Werkstoffs, Matrix und Verstärkungsfasern, sind bei Endlosfaserverstärkung über die Bauteilfläche leider nicht so verteilt, dass überall der gleiche Faservolumengehalt vorliegt und somit der gleiche Volumenschwund stattfindet. Entscheidend für diese ungleichmäßige Verteilung ist die Struktur der Verstärkungshalbzeuge, die deshalb einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenqualität des Faserverbund-Bauteils haben.

Betrachtet werden im Folgenden Faserhalbzeuge, mit welchen der im Kapitel 4.1 beschriebene Lagenaufbau mit den geforderten Mindesteigenschaften dargestellt werden kann. In den Verstärkungsschichten kommen zur Realisierung der hohen mechanischen Eigenschaften Kohlenstofffaserhalbzeuge mit Endlosfasern zum Einsatz, die in  $\pm 45^\circ$  orientiert und gestreckt vorliegen sollen. Für die Darstellung monolithischer Schalen aus CFK bieten sich hierzu insbesondere Gewebe und Gelege an.

#### 4.3.1 Gewebe

Gewebe können mit verschiedenen Bindungen hergestellt werden, was den Fadenverlauf von Kette und Schuss relativ zueinander kennzeichnet. Es gibt hier unzählige Kombinationsmöglichkeiten, von denen einige gängige in Abbildung 4.8 dargestellt sind. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der unterschiedlichen Dichte der Kreuzungspunkte, der Fadenstreckung und dem gebildeten Muster. Die Auswirkungen der Bindung auf die Herstellung von CFK-Bauteilen betreffen Handhabbarkeit, Umformbarkeit und erreichbare mechanische Eigenschaften.

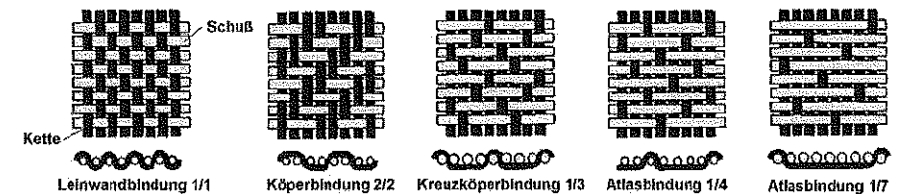


Abbildung 4.8: Verschiedene Bindungen von Geweben

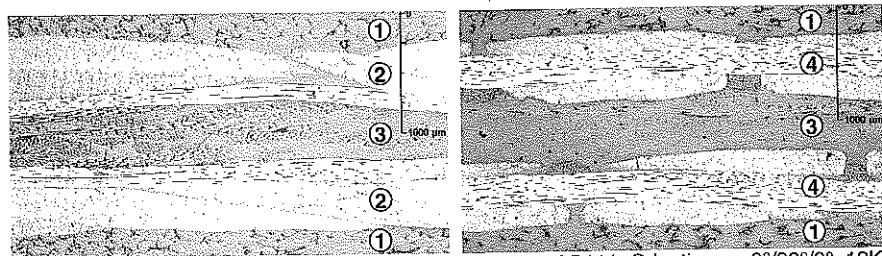
##### 4.3.1.1 Oberflächenqualität bei verschiedenen Geweben

Zur Untersuchung der erreichbaren Oberflächenqualität mit Kohlenstofffasergeweben wurden verschiedene Gewebetypen mit unterschiedlichen Bindungsarten, Rovingstärken und Flächen gewichten ausgewählt und zu Lagenaufbauten kombiniert, die dem Musterlagenaufbau in Kapitel 4.1 entsprechen. Eine Aufstellung der untersuchten Kohlenstofffasergewebe ist in Tabelle 4.6 gegeben.

Tabelle 4.6: Untersuchte Kohlenstofffasergewebe

Bindung	Rovingstärke in K (1000 Filamente)	Flächengewicht in g/m <sup>2</sup>
Atlas ¼	6	365
Atlas ¼	3	285
Atlas ¼	1	120
Köper 2/2	12	660
Leinwand	12	460
Köper 1/3	3	303
Leinwand	1	93
Leinwand	12	375
Atlas 1/7	12	375
AS 111 (Spezialbindung)	12/6	650

In Abbildung 4.9 sind zwei Schliffbilder von Musterteilen mit Gewebeaufbauten gezeigt. Bei der Leinwand-Bindung wird deutlich, dass die Kohlenstofffaser-Rovings in Kette und Schuss gemäß der Bindungsart ondulieren, also wellenartig in den Faserebenen von unten nach oben wechseln. Die ebenfalls gezeigte Bindung AS111 ist ein verwebtes Gelege, das mit einem Webfaden aus Polyester und drei einzelnen unidirektionalen Lagen aus Kohlenstofffasern erzeugt wird.



Bindung Leinwand, Orientierung +45°, 12K

Bindung AS111, Orientierung 0°/90°/0°, 12K

- 1 Oberflächenvlies
- 2 Kohlenstofffasergewebe Leinwand (+45°)
- 3 Textilglasmatte (wirr)
- 4 Kohlenstofffasergewebe AS111 (0°/90°/0°)

Abbildung 4.9: Schliffbilder von Musterteilen mit Gewebeverstärkung

Durch die Verwebung von Kette und Schuss werden die Rovings, zumindest an den Kreuzungspunkten, beidseitig eingefasst und gebündelt, was einem Aufspreizen und flachen Ablegen entgegenwirkt. Durch die Bündelung der Einzelrovings entstehen zwischen diesen in gleichmäßigen Abständen Lücken, welche Bereiche mit geringerem Faservolumengehalt darstellen. Hier findet eine größere Volumenschwindung während der Bauteilherstellung statt als an den Kreuzungspunkten mit erhöhtem Faservolumengehalt.

Dieses Phänomen des Faserabzeichnens kann für Einzelschichten aus Geweben rechnerisch simuliert werden, wie von Sanfeliz, Murthy und Chamis in [109] durchgeführt. Die Gewebe selbst können flächig in verschiedene, sich je nach Bindungsart wiederholende Bereiche auf-

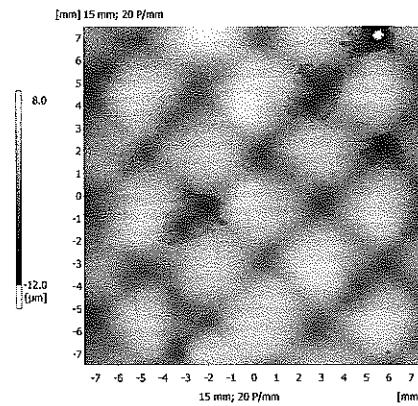
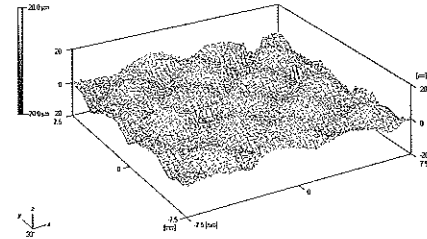
geteilt werden, die unterschiedliche Faservolumenanteile aufweisen. Über eine FEM-Analyse können die Auswirkungen von chemischem und thermischem Schrumpfen in allen Einzelelementen berechnet werden. Das Oberflächenprofil ergibt sich aus dem Verhalten der Einzelzellen sowie der Wechselwirkung der Zellen durch die entstehenden inneren Spannungen im Faser- und Matrixmaterial. Als entscheidende Einflussgrößen werden hier der Faservolumengehalt, besonders in den matrixreichen Regionen, und die Verarbeitungstemperatur genannt. Dies entspricht direkt den beiden Ursachen Inhomogenität des Werkstoffs und Volumenschwindung der Matrix, die in der vorliegenden Arbeit herausgestellt werden.

Allerdings ist für eine solche Simulation der entstehenden Oberflächenstrukturen eine exakte Kenntnis der Volumenänderung aufgrund der chemischen und thermischen Schwindung des Matrixsystems notwendig. Dieses Materialverhalten kann bei Thermoplasten experimentell bestimmt werden. Bei hochreaktiven duromeren Harzsystemen aber gestaltet sich die Ermittlung der chemischen und thermischen Volumenschwindung als äußerst schwierig, wie im Kapitel 6.2 ausführlich beschrieben. Zudem ist für eine FEM-Berechnung der Oberflächenstruktur eine Einteilung der Faserhalbzeuge in wiederkehrende, nebeneinander liegende Flächenelemente erforderlich. Diese flächige Unterteilung kann zwar bei einzelnen Gewebelagen noch durchgeführt werden, ist aber bei Multiaxialgelegen und bei Textilglasmatte nur mit sehr hohem Aufwand oder gar nicht möglich.

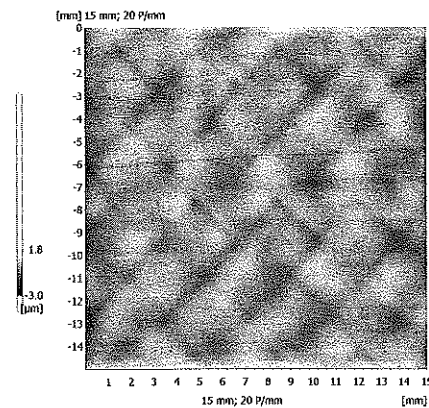
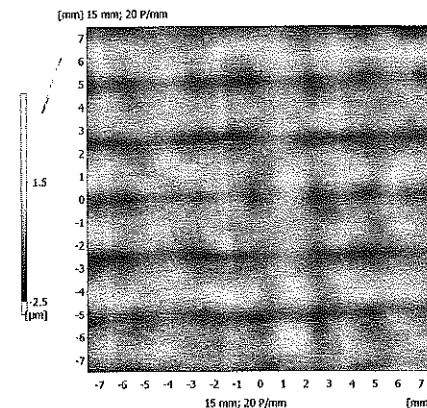
Daher kann für gemischte Lagenaufbauten mit mehreren Verstärkungslagen wie im vorliegenden Fall eine solche Simulation nicht durchgeführt werden. Unbekannt und deshalb einer Simulation nicht zugänglich bleiben die Lage der Einzelhalbzeuge zueinander, die Form und Ausbildung von Lücken zwischen den Faserbündeln (bei Gelegen) und vor allem die flächige Anordnung der Fasern in Textilglasmatte und Oberflächenvlies.

Um die Oberflächeneffekte bei der Faserverstärkung mit Geweben zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4.10 Laserprofilometrie-Bilder der Oberflächen von RTM-Musterbauteilen mit Gewebeverstärkung gezeigt. Es ist erkennbar, dass sich die Struktur der Gewebe, trotz Verwendung von Oberflächenvliesen, direkt an der Oberfläche abzeichnet. Sogar die Bindungsart kann bei den Beispielen Leinwand- und Köper 2/2-Bindung an der Oberflächenstruktur identifiziert werden. Dieses „Schachbrettmuster“ in Richtung von Kette und Schuss des Gewebes ist für das Auge, insbesondere nach der Lackierung, deutlich als regelmäßiges Muster erkennbar. Es zieht sich mit einer klaren Vorzugsrichtung über das gesamte Bauteil hinweg und kann bei allen Gewebetypen auch aus größerer Entfernung noch wahrgenommen werden.



Bindung Leinwand, Orientierung  $\pm 45^\circ$ , 12K

Dazu: 3D-Perspektive und Linienprofil

Bindung Köper 2/2, Orientierung  $\pm 45^\circ$ , 12KBindung AS111, Orientierung  $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ , 12K**Abbildung 4.10:** Laserprofilometrie-Bilder von Musterteilen mit Gewebeerstärkung

Die Auswertung der Lang- und Kurzwelligkeit der Musterplatten mit verschiedenen Geweben ergab keine eindeutige Abhängigkeit dieser Kennwerte von der Bindungsart. Auch der Einfluss der Rovingstärke konnte nicht nachgewiesen werden. Größeren Einfluss scheinen im vorliegenden Fall andere, nicht erfasste Merkmale der Gewebe zu haben. Diese tragen ebenso zur Bildung der „schachbrettartig“ angeordneten matrixreichen und -armen Regionen bei:

- Gleichmäßigkeit der Bindung (Fehlergröße 0,1-1mm)
- Geschlossene Oberfläche, keine Lücken zwischen den Rovings
- Spreizung der Rovings, Verweben „flacher“ Rovings
- Stärke der Einschnürung durch Verweben (abhängig von Abrollvorrichtung, Fadenführung, Webvorgang)

Weiterhin liegen die Werte für Lang- und Kurzwelligkeit für alle untersuchten Gewebe über den geforderten Grenzwerten ( $LW < 8$ ,  $SW < 35$ ). Obwohl einige Gewebetypen Werte für die Langwelligkeit zwischen 10 und 15 ermöglichen, fällt die optische Bewertung aufgrund der Regelmäßigkeit und Deutlichkeit der Textilstruktur für alle Gewebe schlecht aus.

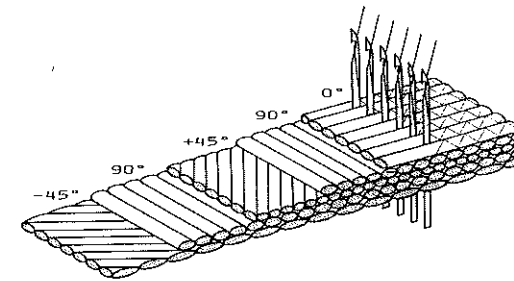
#### 4.3.1.2 Fazit

Es wurden die Effekte an der Bauteiloberfläche betrachtet, die bei der Verwendung von Kohlenstofffasergeweben als Verstärkungshalbzeuge eintreten. Da das textile Flächengebilde hier durch Verweben der Faserbündel zweier Ebenen erzeugt wird, entstehen verschiedene Bereiche mit unterschiedlicher Faserlage und Faservolumengehalt. Vor allem die Kreuzungspunkte und die Ebenenwechsel der Faserbündel führen zu flächig wiederkehrenden, regelmäßigen Strukturen mit sich abwechselnden Faser- und Matrixanhäufungen. Durch die Volumenschwindung der Matrix im RTM-Verfahren zeichnen sich diese Strukturen bei allen betrachteten Geweben stark an der Bauteiloberfläche ab.

Somit kann keines der betrachteten Gewebe die optischen Ansprüche an eine Class-A-Oberfläche erfüllen. Die Gewebe werden deshalb im Vergleich zu den nachfolgenden Halbzeugen, insbesondere den Multiaxialgelegen, als nicht zielführend beurteilt.

#### 4.3.2 Multiaxialgelege

Weit verbreitete Halbzeuge zur Herstellung von großflächigen CFK-Bauteilen sind die verwirkten Multiaxialgelege (WIMAG) mit einer Fixierung durch einen Wirkfaden, wie in Abbildung 4.11 dargestellt. Gelege sind gekennzeichnet durch ein Ablegen der Verstärkungsfasern in Einzelschichten mit den gewünschten Verstärkungsrichtungen. Die  $0^\circ$ -Lage liegt dabei in Produktionsrichtung. Die aufeinander gelegten Einzelschichten werden anschließend in einer Wirkeinheit mit einem Wirkfaden fixiert. Zur Verdeutlichung der Gelegeherstellung ist in Anhang F eine Multiaxial-Gelege-Maschine vom Typ Copcentra der Firma Liba dargestellt.

**Abbildung 4.11:** Multiaxialgelege (WIMAG) mit fünf Fadenlagen [53]

Bei den Gelegen gibt es neben den Hauptmerkmalen Fasertyp, -orientierung, Flächengewicht und Rovingstärke auch zahlreiche Unterschiede hinsichtlich der Ablegetechnik und der Fixierung. So haben sowohl Spulenaufhängung, Fadenführung und Ablegen der Rovings als auch Bindungsart, Material und Spannung des Wirkfadens Einfluss auf die Gelegequalität. Durch die Verwendung von Rovings mit einer Mindeststärke und Automatisierung der Herstellung können Kohlenstofffaserhalbzeuge für die RTM-Fertigung wirtschaftlich gefertigt werden.

Da in dem betrachteten Lagenaufbau eine Kohlenstofffaserverstärkung in  $\pm 45^\circ$ -Richtung erforderlich ist, kommen Bidiagonal-Gelege mit einem entsprechenden Flächengewicht zum Einsatz. Die Rovingstärke ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit auf mindestens 12K festgelegt. Als Bindungsart wird für gute Oberflächenqualität und Umformbarkeit der Gelege eine Trikot/Franse-Bindung mit einem dünnen Nähfaden aus Polyester gewählt. In Abbildung 4.12 sind die Warenoberseite (WOS) und -unterseite (WUS) eines solchen Bidiagonalgeleges aus Kohlenstofffaser gezeigt. Auf der WOS ist die Zick-Zack-Anordnung der Trikot-Bindung zu sehen, auf der WUS die gerade Anordnung der Schlaufen der Franse-Bindung.

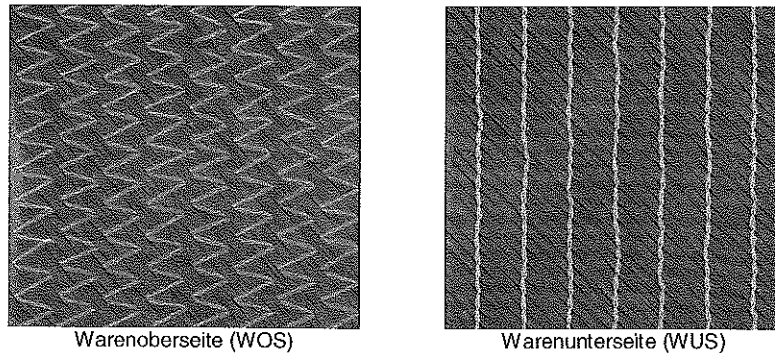


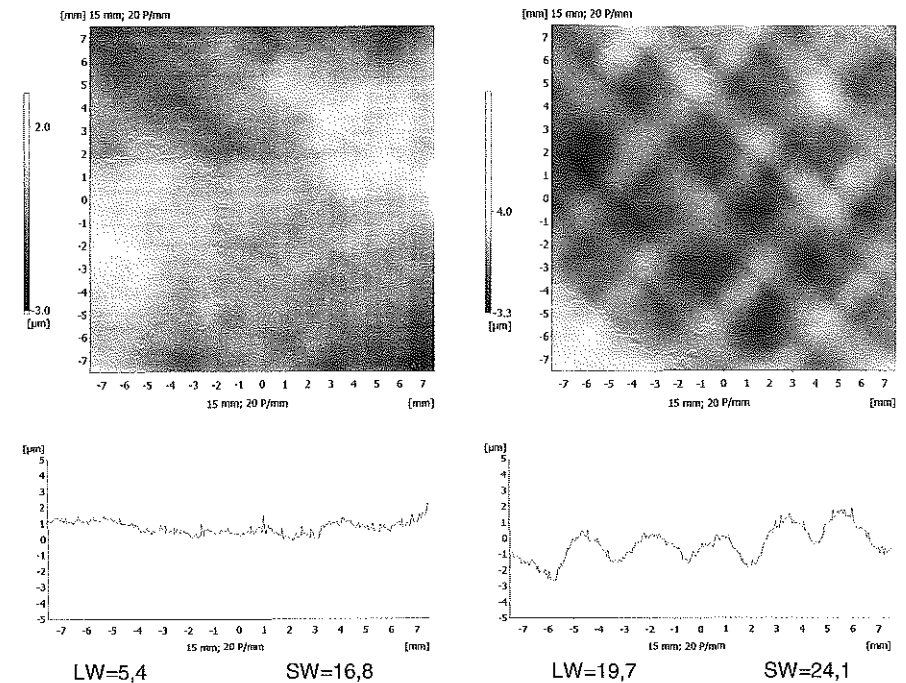
Abbildung 4.12: Warenoberseite und Warenunterseite eines Bidiagonalgeleges

#### 4.3.2.1 Oberflächenqualität mit verwirkten Multiaxialgeleges

Speziell zur Darstellung hochwertiger Oberflächen wurden mit mehreren Lieferanten für Kohlenstoffasergelege abgestimmte Bidiagonal-Gelege spezifiziert und in Mustermengen hergestellt. Ziel dieser Gelegeentwicklung war es, ein Halbzeug mit gleichmäßiger und homogener Faserverteilung zu erhalten und damit Bauteile herzustellen, die nach der Lackierung eine Class-A-Oberflächenqualität aufweisen.

Für eine gleichmäßige Faserverteilung müssen sich die Rovings im fertigen Gelege flach ablegen und die Grenzen zwischen den Einzelrovings verschwimmen. Die Abrollvorrichtung muss eine Verdrehung der Rovings, z.B. beim stirnseitigen Abzug von den Spulen, unterbinden und eine gleichmäßige Fadenspannung gewährleisten. Ferner sollen die Fadenführungen eine erneute Bündelung der Rovings vermeiden, damit eine Aufspreizung beim Ablegen möglich ist.

Die Fixierung durch Einstechen der Wirknadeln und Durchführen der Wirkfäden muss möglichst geringe Veränderungen dieser gleichmäßigen Faserverteilung verursachen. Dies kann nur durch Optimierung der Nadelführung, der Bindungsart, der Nähfäden und der Fadenspannung erreicht werden. Um die Auswirkungen dieser Abstimmungen auf Oberflächenqualität zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4.13 Laserprofilometer-Ergebnisse eines für hohe Oberflächenqualität geeigneten und eines dafür ungeeigneten Geleges dargestellt. Fasertyp, Faserorientierung, Flächengewicht, Rovingstärke und Bindungsart sind bei beiden Gelegetypen gleich. Abrollgatter, Ablegevorrichtung, Nähfadentyp sowie Fadenspannung sind verschieden.



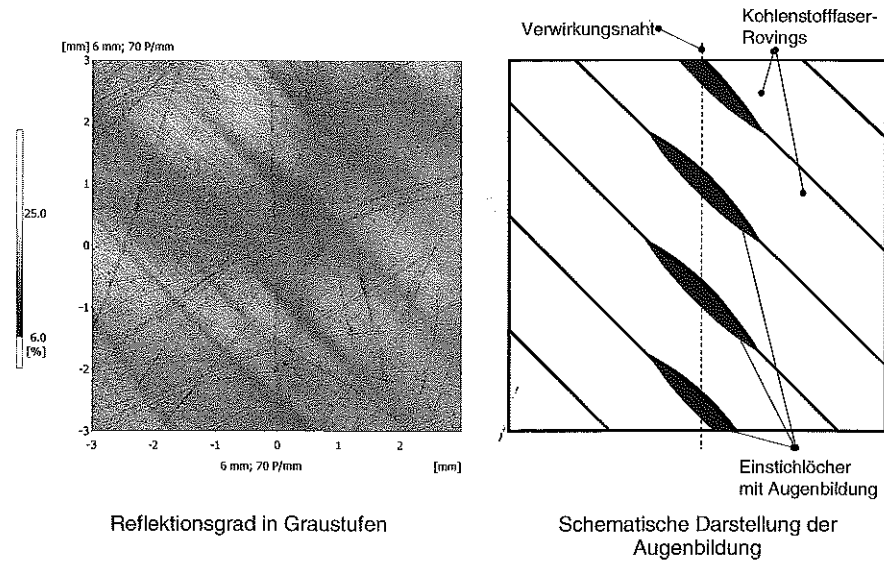
Auf Oberflächenqualität abgestimmtes Gelege

Nicht abgestimmtes Gelege

Abbildung 4.13: Oberflächenstruktur zweier WIMAG-Typen

Doch selbst bei der Verwendung von abgestimmten Gelegen treten typische Probleme auf. Die Vernähung der Gelege in der Wirkeinheit führt durch das Eintragen des Wirkfadens mit Nadeln zu Einstichlöchern. Da mit dem Wirkfaden gemäß der Bindungsart zwischen den Einstichlöchern eine Verschlingung vollzogen wird, kommt es aufgrund der Wirkfadenspannung zu einer Einschnürung der Kohlenstofffaser-Rovings. Diese Einschnürung führt zu einer Ausbildung von linsen- oder augenförmigen Lücken zwischen den Rovings an den Einstichlöchern.

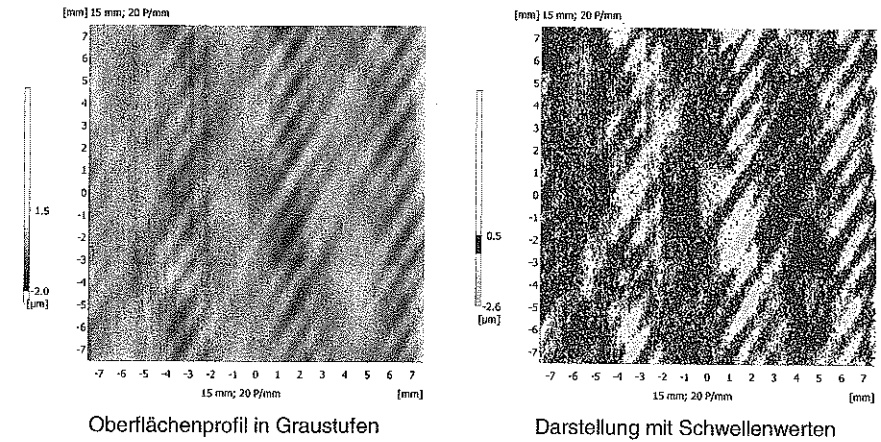
In Abbildung 4.14 ist zur Verdeutlichung des Problems diese Augenbildung anhand zweier Bilder gezeigt. Das erste Bild ist eine Darstellung des Reflektionsgrades der Oberfläche und zeigt, unter der Oberfläche liegend, das Halbzeug selbst. Die linsenförmigen Einschnürungen, in 45°-Richtung bei jedem Einstichloch sind klar erkennbar.



**Abbildung 4.14:** Augenbildung an den Einstichlöchern durch die Verwicklung

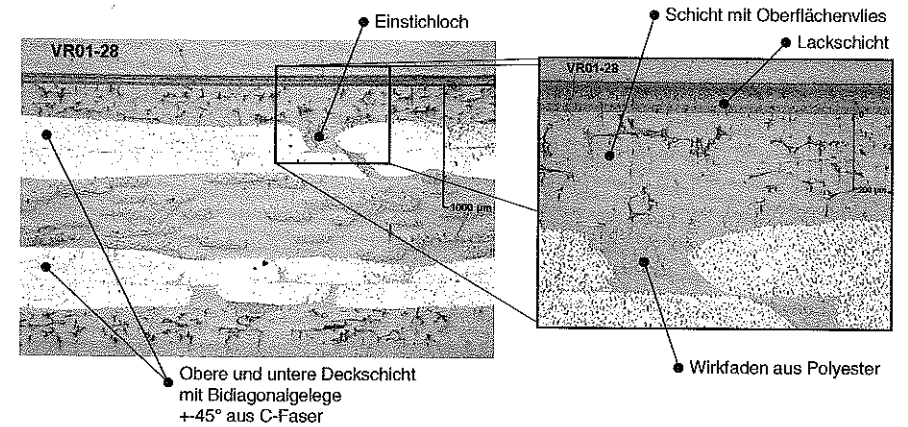
In den zwei Laserprofilometer-Bildern in Abbildung 4.15 sind die Auswirkungen der „Augen“ auf die Oberflächenstruktur dargestellt. Ebenfalls in Verstärkungsrichtung angeordnet, verlaufen die Abzeichnungen der Einstichlöcher wie ein Strichmuster entlang der Naht mit dem Wirkfaden. Die Verwicklungsnähte sind in einem Abstand von 5 mm angeordnet und verlaufen in 0°-Richtung als Linien über das gesamte Halbzeug. Der Stichabstand in einer Naht beträgt ca. 1,5 mm, was am Oberflächenprofil ebenfalls abgelesen werden kann.

Auch wenn die Amplitude dieser Störungen mit wenigen Mikrometern sehr klein ist, bleiben diese regelmäßigen Störungen, vor allem durch ihre Ausrichtung und Anordnung auf Linien, auf einer lackierten Bauteiloberfläche für das Auge sichtbar.



**Abbildung 4.15:** Auswirkung der Augenbildung auf die Oberflächenstruktur

Das Aufspreizen und Einschnüren der Kohlenstofffaser-Rovings ist auch im Schlibbild zu erkennen. In Abbildung 4.16 sind die Einzellagen aus Kohlenstofffaser mit den Einstichen durch die Verwicklung und der Wirkfaden, der die Gelelagen untereinander mit einer Trikot/Franse-Bindung verwickelt, sichtbar. Weiterhin zeigt diese Darstellung die Größenverhältnisse der Einstichlücken, der Einzelrovings, der matrixreichen Schicht mit Oberflächenvlies und der Lackschicht.



**Abbildung 4.16:** Schlibbild einer Probe mit Gelegeverstärkung, Gesamtansicht und Detail

Zusammen mit zwei Gelegeherstellern wurden Möglichkeiten untersucht, um diesen Effekt zu vermindern. Dabei wurden die in Tabelle 4.7 aufgeführten Einflussgrößen variiert und deren Auswirkungen auf die Oberflächenqualität der RTM-Musterteile untersucht.

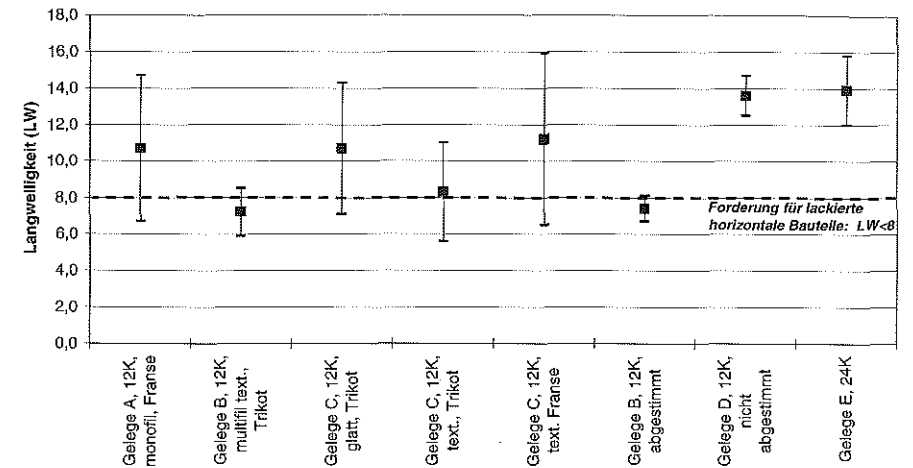
**Tabelle 4.7:** Untersuchte Einflussgrößen der Gelegeherstellung

Einflussgröße / Maßnahme	Variation
Gestaltung des Abrollgatters und Ablegevorrichtung (Fadenabzug, Fadenspannung, Fadenführung)	Abstimmung bei Gelegehersteller: ursprüngliche und abgestimmte Anlagenkonfiguration; Zwei Gelegehersteller (unterschiedliche Anlagen)
Rovingstärke	12K oder 24K
Wirkfadengewicht	50 dtex, 76 dtex, 110 dtex
Wirkfadenart	texturiert oder glatt, monofil oder multifil
Wirkfadenspannung	Abstimmung bei Gelegehersteller; Zwei Gelegehersteller
Bindungsart	Franse oder Trikot/Franse
Bindungsdichte	5 pro Inch, 2,5 pro Inch oder 0,5 pro Inch oder keine (Nähfäden per Hand herausgelöst)
Verwendung auflösender Nähfäden	konventionelle Nähfäden oder wasserlösliche Nähfäden, vor Injektion gelöst

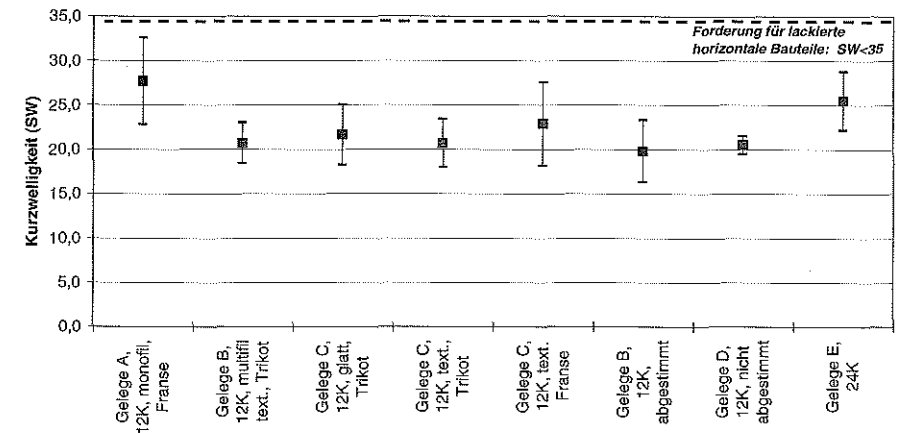
Von den untersuchten Variationen zeigen einige einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächenqualität der Musterbauteile. So ist die gleichmäßige und verdrehungsfreie Ablage der Rovings in der Ablegevorrichtung entscheidend für die Gelegequalität. Der Fadenabzug und die Fadenführung müssen Verdrehungen und Bündelung verhindern und ein lockeres, flach aufgespreiztes Ablegen ermöglichen. Die Fadenspannung beim Ablegen muss gleichmäßig sein, damit keine Störungen durch Spannungsschwankungen ins Gelege eingebracht werden. Der Wirkfaden sollte so dünn, leicht und flexibel wie möglich sein, um seinen Einfluss auf die Oberflächenqualität gering zu halten. Die Einstichlöcher werden mit zunehmender Wirkfadenspannung größer, was die Oberflächenqualität vermindert. Die Bindungsart sollte eine Anhäufung der Störungen auf einer Linie vermeiden und die Fadenspannung auf die Kohlenstoffasero Rovings flächig verteilen. Deshalb bietet sich hier die Trikot-Bindung an, die in Zick-Zack-Anordnung die gesamte Fläche überspannt. Zudem ist eine unregelmäßigere Anordnung der Wirkbindung von Vorteil, damit die Ausbildung von sich wiederholenden Mustern, wie Linien in gleichem Abstand, vermieden wird.

Zu diesem Ergebnis führt auch die Variation der Bindungsdichte. In den Bereichen der Bindungsnähte selbst ist die Oberfläche durch die Einstiche und Einschnürungen gestört. Ein Verringern der Bindungsdichte führt somit zu weniger Störungen und besserer Gesamtqualität. Allerdings wird bei größerem Nahtabstand die Handhabung schwieriger. Ausfransen beim Beschnitt und Verzug bei der Handhabung sind die hier auftretenden Hauptprobleme.

Zum Vergleich verschiedener, ausgewählter Gelegetypen sind in Abbildung 4.17 die erreichte Langwelligkeit und in Abbildung 4.18 die Kurzwelligkeit gezeigt. Die besten Ergebnisse werden hier mit Gelege B erzielt, mit der Trikot/Franse-Bindung und einem multifilen, texturierten Nähfaden. Im Vergleich der Gelegetypen C untereinander schneidet die Trikot/Franse-Bindung gegenüber der Franse-Bindung besser ab, ebenso der texturierte gegenüber dem glatten Nähfaden. Im Vergleich der Kurzwelligkeiten zeigen die verschiedenen Gelegetypen kaum Unterschiede. Die Art der Verwicklung, die Einstichlöcher und der Wirkfaden selbst haben keinen entscheidenden Einfluss auf die Störungen von 0,1...0,6 mm, sondern ganz eindeutig auf langwelligere Störungen mit Wellenlängen größer als 0,6 mm.



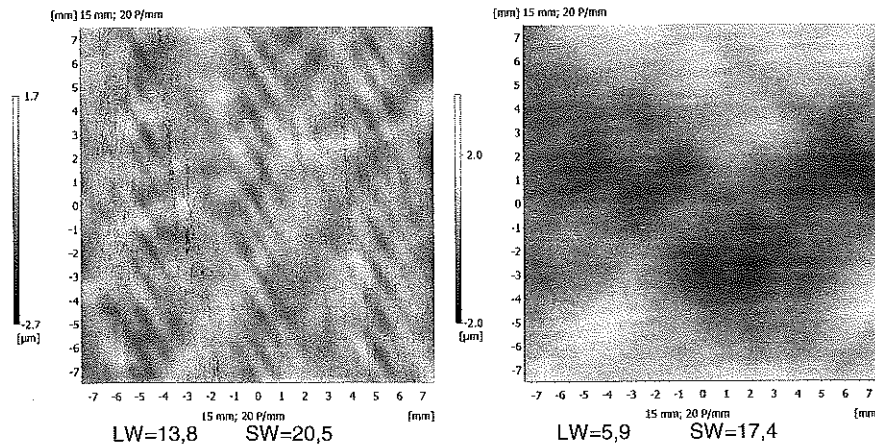
**Abbildung 4.17:** Langwelligkeit nach Byk-Gardner - Vergleich verschiedener Gelegetypen



**Abbildung 4.18:** Kurzwelligkeit nach Byk-Gardner - Vergleich verschiedener Gelegetypen

Die Störungen durch die Einstiche bei der Gelegeherstellung können auch nachträglich wieder verringert werden. Dies stellt einen neuartigen Ansatz zur Lösung des identifizierten Problems mit den Einstichlöchern und Einschnürungen dar. Mit auflösenden oder schmelzenden Nähfäden bietet sich die Möglichkeit, ein zum Handling stabiles Gelege zu haben, in welchem nach den RTM-Prozessschritten keine einzelnen Wirkfäden mehr vorhanden sind. Die Wirkfadenspannungen werden eliminiert und die Rovings können die Augen an den Einstichlöchern wieder schließen.

Zur Untersuchung dieser Möglichkeit wurden Mustergelege mit in Wasser löslichen Nähfäden aus Polyvinylalkohol (PVA) hergestellt. Diese sind wie Gelege mit Polyester-Wirkfäden zu handhaben und zuzuschneiden. Nach dem Belegen und Schließen des Werkzeugs werden die Nähfäden mit heißem Wasser ausgewaschen. Nach einer anschließenden Trocknung mittels Vakuum und heißer Luft kann der Injektionsvorgang erfolgen. Die Ergebnisse sind gemäß der Erwartungen sehr gut. Die in Abbildung 4.14 beschriebenen Störungen an den Einstichen werden beim Auflösen der Nähfäden beseitigt, und die Einzelrovings sind nicht mehr erkennbar. Die Faserverteilung, bei gerichteter Endlosfaserverstärkung in  $+45^\circ$ -Richtung, ist sehr gleichmäßig. In Abbildung 4.19 ist das Oberflächenprofil eines Musters nach Herauslösen der Wirkfäden im Vergleich zu einem konventionellen WIMAG gezeigt. Die gemessenen Welligkeitswerte verringern sich erheblich, im vorliegenden Beispiel von  $LW=13,8$  auf  $LW=5,9$ .



Mit konventionellen Wirkfäden

Nach Herauslösen der PVA-Wirkfäden

**Abbildung 4.19:** Verbesserung der Oberflächenqualität durch den Einsatz von löslichen Wirkfäden

So konnte unter gleichen Randbedingungen (Matrixsystem, Prozessparameter, Oberflächenvlies...) eine höhere Oberflächenqualität als mit verwickelten Multiaxialgelegen erreicht werden. Durch das Eliminieren der regelmäßigen Strukturabzeichnung an der Bauteiloberfläche bei gleichzeitig ausreichend niedrigen Welligkeitswerten ist hier ein möglicher Weg zum Erreichen

von Class-A-Oberflächenqualität aufgezeigt. Da das Auflösen der Wirkfäden ein Schließen der Einstichlöcher und ein Entspannen der Rovings verursacht, werden allerdings auch die Fließkanäle im Gelege für die Injektion des Matrixmaterials vermindert oder geschlossen. Aufgrund der dadurch niedrigeren Permeabilität gestalten sich die Infiltration und vollständige Durchtränkung des Geleges im Injektionsvorgang schwieriger.

Ein Hauptproblem bei der Verwendung von Multiaxialgelegen bleibt die Gelegequalität, was fehlende oder versetzt abgelegte Rovings betrifft. Ein fehlender Roving führt lokal zu einer starken Verringerung des Faservolumengehalts, beim dargestellten Lagenaufbau beispielsweise um 18%. Ein versetztes Ablegen zweier Rovings aufeinander verursacht dementsprechend eine Erhöhung des Faservolumengehaltes. Störungen solchen Ausmaßes bewirken zwangsläufig eine Abzeichnung an der Bauteiloberfläche. Da diese Gelegefehler sich meist über eine große Länge in Rovingrichtung erstrecken, führen sie linienförmigen und gut sichtbaren Oberflächenstrukturen. Sie zählen deshalb zu den Fehlern, die bei einer visuellen Beurteilung beanstandet werden. Zur Vermeidung unnötiger Material- und Verarbeitungskosten, die durch solche Gelegefehler verursacht werden, sind deshalb vom Gelegelieferant bei der Herstellung der Kohlenstoffasergelege entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen zu ergreifen und vom Verarbeiter Eingangskontrollen durchzuführen.

#### 4.3.2.2 Fazit

Bei verwickelten Multiaxialgelegen (WIMAG) aus Kohlenstofffasern stellen die Einstichlöcher beim Verwickeln und die Bündelung der Kohlenstoffasero Rovings durch das Ablegen und den Wirkfäden die wesentlichen Störungen dar, die sich an der Bauteiloberfläche abzeichnen. Die Multiaxialgelege bieten aber zahlreiche Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Bindungsart, des Wirkfadens, der Herstellungsparameter und der verwendeten Anlagentechnik zum Vermindern der Oberflächenstrukturen.

Zur Untersuchung dieser Einflüsse wurden verschiedenste Gelegetyper nach neuen Spezifikationen hergestellt, im RTM-Verfahren verarbeitet und die Effekte auf die Oberflächenqualität ermittelt. Es zeigte sich, dass eine auf Gleichmäßigkeit der Faserverteilung abgestimmte Ablegetechnik unerlässlich ist. Zudem bietet die Trikot/Franse-Bindung mit einem multifilen, texturierten Faden und abgestimmter Fadenspannung Vorteile hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenqualität gegenüber den anderen betrachteten Varianten. Dieser neue Gelegetyper stellt derzeit die bestmögliche, kurzfristig machbare Lösung bei der Verwendung von Multiaxialgelegen dar. Die Abzeichnung der Halbzeugstrukturen an der Oberfläche konnte durch die Gleichmäßigkeit des Geleges auf ein sehr geringes Niveau vermindert werden. Der Vergleich zwischen nicht abgestimmter und optimierter Gelegeherstellung, als Resultat der vorliegenden Untersuchung, ist in Abbildung 4.13 gezeigt. Die LW-Werte der erzeugten Oberflächen können dadurch im vorliegenden Beispiel von ca. 20 auf  $<6$  reduziert werden.

Weiterführend für die Verwendung von Multiaxialgelegen ist die Eliminierung der Störungen, die durch das Verwickeln verursacht werden. Hier bietet sich zum einen eine Reduzierung der

Anzahl der Wirknähte an, was die Oberflächenstörungen zumindest in ihrer flächigen Ausdehnung verringert.

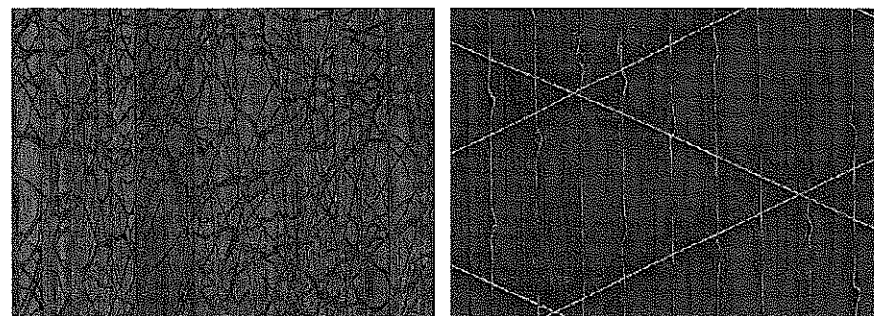
Die Ideallösung scheint das Herauslösen aller Wirkfäden vor oder während des Injektionsschrittes im RTM-Prozess zu sein. Dieser neue Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit als Konsequenz aus der Ursachenermittlung entwickelt und erstmals anhand von speziell angefertigten Gelegen untersucht. Durch das Auflösen der Wirkfäden können sich die Kohlenstofffaser-Rovings entspannen und die Wirkfadenstörungen ausgleichen. Mit diesen neuartigen Halbzeugen konnten Ergebnisse erreicht werden, welche die Oberflächenqualität bei Verwendung konventioneller verwirkter Multiaxialgelege in der optischen Beurteilung übertreffen (siehe Abbildung 4.19 rechts) und geeignet für Bauteile mit Class-A-Oberflächenqualität sind. Allerdings ist für die serientaugliche Umsetzung noch Verfahrensentwicklung zu betreiben. Für einen wirtschaftlichen Prozess ist eine Verlagerung des Auflösungs Vorgangs in den Preformschritt zielführend, um den RTM-Zyklus nicht zu verlängern. Problematisch bei auflösenden Wirkfäden ist die Verschlechterung der Tränkungseigenschaften der Faserhalbzeuge durch Wegfall der Fließkanäle, die durch das Verwirken gebildet werden.

### 4.3.3 Unidirektional-Gelege

Einige Hersteller von Faserhalbzeugen bieten auch Gelege in verschiedenen Flächengewichten an, die nicht mittels Wirkfäden fixiert sind. Statt dessen kommen verschiedene andere Methoden zur Fixierung zum Einsatz, welche die geschlossene Fläche des Geleges möglichst nicht stören sollen. Solche Gelege werden oft als Unidirektional(UD)-Gelege mit Fasern nur in 0°-Richtung hergestellt, um die mechanischen Eigenschaften der Fasern optimal nutzen zu können. Neben der Herstellung reiner UD-Gelege ist auch ein Ablegen und Fixieren in mehreren Richtungen möglich. Somit entsteht wieder ein multiaxialer Aufbau, mit dem auch die hier geforderte +45°-Verstärkung dargestellt werden kann.

#### 4.3.3.1 Oberflächenqualität mit Unidirektional-Gelegen

Bei der Betrachtung von solchen nicht vernähten Gelegen in dieser Arbeit wurden zwei Typen eingesetzt, die beide mittels Polyester-Fäden verklebt sind (siehe Abbildung 4.20). Solche UD-Gelege kommen beispielsweise in der Bauindustrie zur Verstärkung von Trägern zum Einsatz. Bei der einen Type wird die Fixierung als geschmolzenes Polyester regellos auf die Gelegelagen aufgesprüht, so dass nach dem Erstarren eine Fixierung in Form eines „Spinnennetzes“ entsteht. Beim zweiten Gelegetyp fixiert ein aufgeklebtes diagonales Gitter aus Polyesterfäden die Gelegelagen einzeln und untereinander. Diese „Gitter“-Fixierung kann ein- oder beidseitig aufgebracht sein.



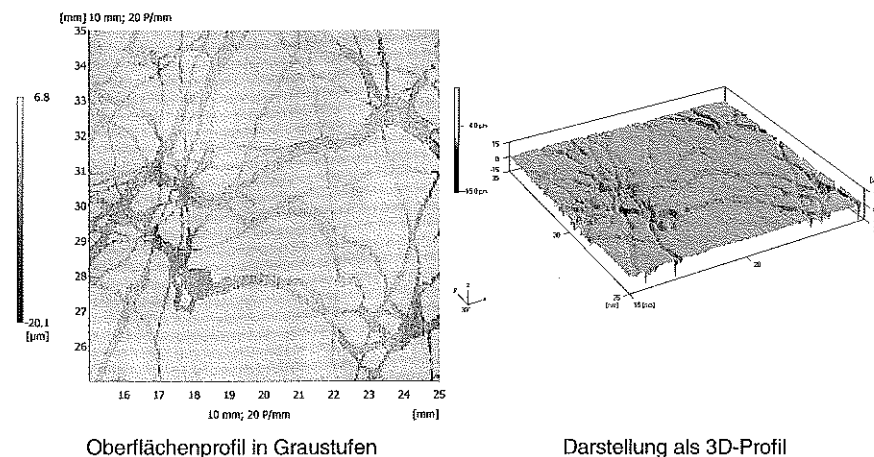
„Spinnennetz“-Fixierung

„Gitter“-Fixierung

Abbildung 4.20: Gelegetypen mit Fixierung durch Verklebung mit Polyesterfäden

Die gleichmäßigen Störungen, die bei den verwirkten Multiaxialgelegen durch die Bündelung und Augenbildung entstehen, treten hier naturgemäß nicht auf. Allerdings stellt der zur Verklebung eingesetzte Polyesterfaden selbst eine Störung der gleichmäßigen Faserverteilung dar, die an der Oberfläche sichtbar ist. Dabei wirkt sich der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient ( $\alpha_{th} \approx 55 \times 10^{-6} 1/K$ ) des Polyesters im Vergleich zum Epoxidharz ( $\alpha_{th} \approx 11-35 \times 10^{-6} 1/K$ ) ungünstig aus. Somit fallen diese Stellen an der Oberfläche allein aufgrund des thermischen Schrumpfes bei der Abkühlung von der Herstellungs- auf Raumtemperatur ein.

In Abbildung 4.21 ist das Oberflächenprofil eines mit Spinnennetz-Gelege hergestellten Musterstücks gezeigt.



Oberflächenprofil in Graustufen

Darstellung als 3D-Profil

Abbildung 4.21: Laserprofilometrie-Bilder eines Musterstücks mit „Spinnennetz“-Gelege

Genau an den Stellen mit der Polyester-Verklebung bilden sich deutliche Einfallstellen, die wie eine Tälerlandschaft über die Bauteiloberfläche ausgebreitet sind. Nach der Lackierung sind diese Einfallstellen klar erkennbar und nicht akzeptabel. Die Ausbildung der Einfallstellen und deren Tiefe ist von der Verarbeitungstemperatur und der Dicke der Polyesterfäden abhängig. Durch Optimierungen kann der Effekt sicherlich vermindert, wenn auch nicht eliminiert werden.

Bei der Verklebung mit einem Polyestergeritter reicht bis zu einem maximalen Flächengewicht die Fixierung jeder Lage von nur einer Seite aus, um das Gelege noch handhaben zu können. So kann zur Außenseite des Bauteils hin die letzte Lage ohne Polyestergeritter angeordnet werden, was den oben beschriebenen Effekt verringert. Die störenden Polyesterfäden liegen jetzt weiter von der Oberfläche entfernt im Innern des Lagenaufbaus. Die resultierenden Oberflächen sind fast frei von Störungen und zeigen bei der Messung mit dem Wave-Scan-Plus sehr niedrige Welligkeitswerte.

Ein Beispiel für eine Oberfläche eines mit Gitter-Gelege hergestellten Bauteils ist in Abbildung 4.22 gezeigt. Bei Verwendung eines Hochpass-Filters wird schwach die  $+45^\circ$  und  $0^\circ$ -Struktur der Faserverstärkung sichtbar, allerdings mit einer sehr geringen Amplitude von weniger als  $+1 \mu\text{m}$ . Das fixierende Polyestergeritter in  $+60^\circ$  ist bei dem vorliegenden Muster nicht erkennbar. Allerdings tritt auch hier die Struktur der Polyesterfäden bei höheren Verarbeitungstemperaturen stärker auf.

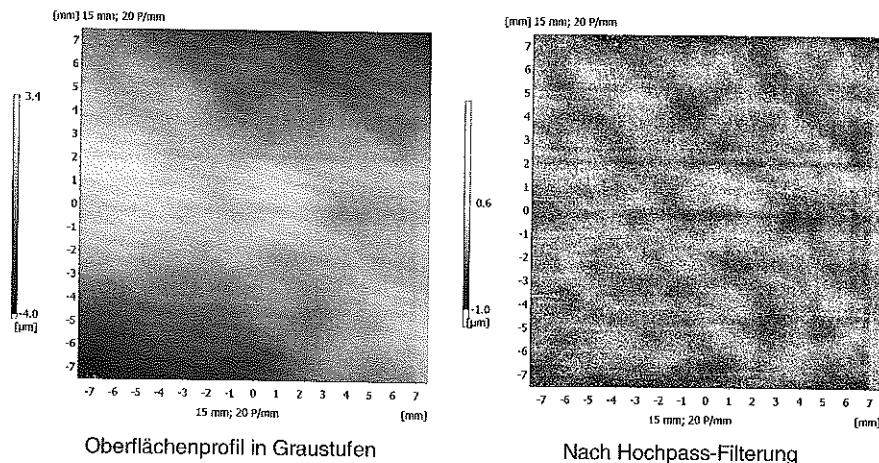


Abbildung 4.22: Laserprofilometrie-Bilder eines Musters mit „Gitter“-Gelege

Dieser Gelegetyp ist sicher zielführend zum Erreichen einer Class-A-Oberflächenqualität. Allerdings treten Schwierigkeiten bei der Verarbeitung zu dreidimensional geformten Bauteilen auf. Die Handhabung erfordert größere Sorgfalt und Vorsicht, da die Verklebung nicht so stabil wie eine Verwirkung ist. Da das Polyestergeritter leicht haftend ist und ein Ankleben an der nächsten

Gelegewicklung auf der Rolle verhindert werden muss, sind die Gelege einseitig mit Trennfolie beschichtet. Nach dem Zuschneiden und vor dem Einlegen ins Werkzeug wird diese mit zusätzlichem Arbeitsaufwand entfernt. Die Umformbarkeit der durch Verklebung fixierten Gelege ist eingeschränkt. Wird beim Thermoumformen die Polyester-Verklebung an- oder aufgeschmolzen, werden die Gelege zwar umformbar, allerdings fehlt dann die Führung für ein Scheren oder paralleles Gleiten der Rovings zueinander.

Eine weitere Einschränkung bei der Verwendung von verklebten Gelegen stellt das schwierigere Füllverhalten dar. Durch das Fehlen von Fließkanälen in Form von Einstichlöchern auf Nähten ist die Tränkung der Kohlenstofffaser-Rovings in der Ebene, aber vor allem auch in Dickenrichtung, schwieriger. So entstehen im Vergleich zu den verwirkten Multiaxialgelegen bei der Injektion wesentlich höhere Fülldrücke oder längere Injektionszeiten und auch häufiger Trockenstellen und Porigkeit. Dies muss durch längere Füllzeiten und Abstimmung der anderen Faserhalbzeuge im Lagenaufbau kompensiert werden.

#### 4.3.3.2 Fazit

Die Verwendung von Unidirektional-Gelegen, die durch eine Verklebung mit Polymerfäden fixiert sind, kann große Vorteile für die Oberflächenqualität bewirken. Durch das Fehlen der Verwirkung sind die Oberflächen fast frei von gerichteten, regelmäßigen Störungen. Eine beidseitige Verklebung führt zu Einfallstellen in Form der aufgeklebten Polymernetze. Insbesondere die Fixierung von nur einseitig aufgeklebten Polyester-„Gittern“ weist ein großes Potenzial zur Erreichung einer Class-A-Oberflächenqualität auf. Allerdings stellt die Verarbeitung zu dreidimensionalen Bauteilen eine große Herausforderung dar, da das Fehlen der „beweglichen“ Fixierung durch das Verwirken während des Preform-Schrittes eine kontrollierte Umformung erschwert. Falls die Herstellung eines dreidimensionalen Preforms verfahrenstechnisch weiterentwickelt werden kann, zeichnet sich hier mittelfristig ein Verstärkungsmaterial mit der besten erreichbaren Oberflächenqualität ab. Für Bauteile oder Bauteilbereiche mit geringen Umformgraden stellen diese Faserhalbzeuge schon jetzt eine kurzfristige Lösungsmöglichkeit dar.

Als weitere Schwierigkeit für einen serientauglichen RTM-Prozess bleibt auch hier das problematische Tränkungsverhalten der sehr dichten Faserhalbzeuge ohne Fließkanäle durch die Fixierung. Bei Verwendung dieser Halbzeuge sind bei den Fülldrücken und Füllzeiten und somit auch bei der Gesamtzykluszeit Kompromisse einzugehen.

#### 4.3.4 Vergleich der Verstärkungshalbzeuge

Im Vergleich der Verstärkungshalbzeuge untereinander schneiden die Gewebe aufgrund ihres stark inhomogenen Aufbaus und des resultierenden „Schachbrett“-Musters an der Oberfläche schlechter ab als die verwirkten Multiaxialgelege und die verklebten UD- und Multiaxialgelege. Auch der Einsatz von Oberflächenvliesen und besonderer Prozessführung zur Schrumpfminderung bei der Herstellung kann diesen Effekt nicht beheben. Dieser Nachteil ist sicherlich durch weitere Halbzeugoptimierungen zu vermindern. Dazu bieten sich die Verwendung von

besonders flachen und breiten Faserbündeln in Kette und Schuss an. Weiteres Potenzial bietet eine Optimierung der Bindungsart hin zu geringer Bindungsdichte mit möglichst geringer Ondulation der Rovings und weiter, regelloser Verteilung der Kreuzungspunkte.

Bei den Gelegen lässt sich die Oberflächenqualität durch die Betrachtung der Lang- und Kurzwelligkeit nur noch eingeschränkt beurteilen. Sobald die geforderten Höchstwerte unterschritten sind, liegt das Hauptproblem vielmehr in der Regelmäßigkeit der auftretenden Oberflächenstrukturen, die durch die Fixierung mittels Wirkfäden oder Verklebung hervorgerufen werden.

So haben die verwirkten Multiaxialgelege mit verschiedenen Bindungsarten, Wirkfäden und Herstellparametern immer das Problem der Verwirkung selbst. Durch die Einschnürung der Rovings und die Bildung von linsenförmigen Lücken wird die Verstärkungsrichtung an der Bauteiloberfläche sichtbar. Trotz sehr kleiner Amplituden sind diese Strukturen wegen ihrer Regelmäßigkeit und linienförmigen Ausdehnung mit dem Auge an der Oberfläche lackierter Bauteile deutlich sichtbar. Entscheidend für eine hohe Oberflächenqualität ist eine optimierte Ablegetechnik mit möglichst gleichmäßiger Faserverteilung über die Gelegefläche. Die Verwirkung mit einem texturierten, multifilen Nähfaden und der Trikot/Franse-Bindung führte zu den besten Ergebnissen.

Die verklebten UD- und Multiaxialgelege hingegen weisen keine Einstiche oder Einschnürungen auf. Hier können die Rovings sehr flach und gleichmäßig nebeneinander liegen. Die Verklebung mit einer Fixierungsstruktur aus Polyester stellt nur dann Probleme für die Oberflächenqualität dar, wenn diese zu nah an der Bauteiloberfläche liegt. Im Zusammenspiel von Polyesterfadendicke und Verarbeitungstemperatur kann es hier ebenfalls zu Abzeichnungen an der Oberfläche kommen. Obwohl diese Materialien in der Verarbeitung im RTM-Prozess, z.B. beim Preforming, problematisch sind, stellen sie den besten Stand der Oberflächenqualität dar. Dies zeigt sich sowohl anhand der LW- und SW-Werte als auch bei der Betrachtung der Laserprofilometer-Bilder und der Beurteilung der Musterteile mit dem Auge.

In Abbildung 4.23 sind die Werte für die Langwelligkeit und in Abbildung 4.24 für die Kurzwelligkeit für verschiedene Gelegetypen zum Vergleich angegeben. Dabei sind auch Kombinationen aufgeführt, bei denen UD-Gelege zusätzlich auf dem Bidiagonal-Gelege platziert sind. Im Direktvergleich, unter Beibehaltung aller weiteren Einflussgrößen wie Materialien und Herstellungsparameter, sind die Unterschiede klar ersichtlich. Dabei ist das niedrige Niveau aller Ergebnisse im Vergleich zu den geforderten Grenzwerten von  $LW < 8$  und  $SW < 35$  für lackierte horizontale Bauteile auffällig. Durch die Abstimmung der Materialien und Herstellungsparameter können am unlackierten Bauteil die Grenzwerte mit fast allen zielführenden Halbzeugen unterschritten werden. Einzig das „Spinnennetz“-Gelege erzeugt eine höhere Langwelligkeit und Streuung der Messwerte.

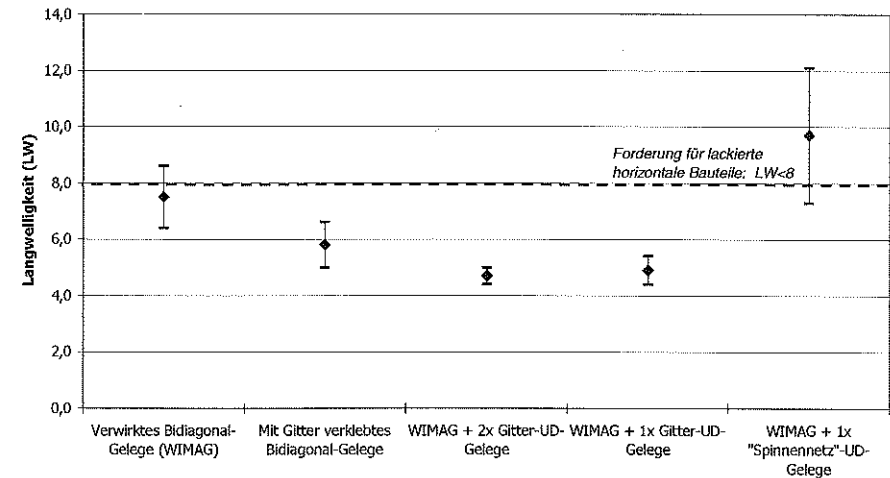


Abbildung 4.23: Direktvergleich verschiedener Gelegetypen anhand von LW-Werten

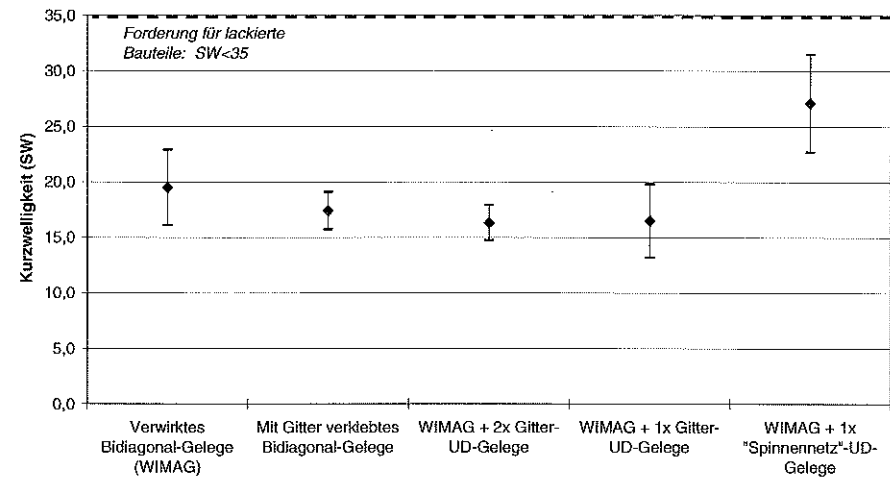


Abbildung 4.24: Direktvergleich verschiedener Gelegetypen anhand von SW-Werten

Im Folgenden werden vor allem die verwirkten Multiaxialgelege für weitere Betrachtungen herangezogen. Sie stellen derzeit den besten erreichbaren Stand bei Betrachtung aller Anforderungen an Oberflächenqualität, Umformbarkeit, Tränkbarkeit, Handhabung und Wirtschaftlichkeit dar. Mittelfristig, oder für besondere Anwendungsfälle auch kurzfristig, bieten die Unidirektional-Gelege und deren multiaxiale Kombinationen mit einer Fixierung durch aufgeklebte Polymergitter große Vorteile hinsichtlich der Oberflächenqualität.



#### 4.4 Kernmaterialien

##### 4.4.1 Oberflächenqualität mit verschiedenen Textilglasmatten

Zur Verstärkung der Kernschicht im „Mikro-Sandwich“ werden Textilglasmatten eingesetzt. Auch diese haben einen großen Einfluss auf die Oberflächenqualität. Obwohl zwischen der Kernschicht und der Bauteiloberfläche noch die Verstärkungsschicht und die matrixreiche Oberflächenschicht liegen, können sich doch die einzelnen Faserbündel an der Oberfläche abzeichnen. Da die Faserverteilung in den Glasfasermatten lokal schwankt, kommt es zusätzlich zur Ausbildung von Regionen mit niedrigerem und höherem Faservolumenanteil. Auch hier gilt prinzipiell: Je gleichmäßiger und homogener die Faserverteilung im Halbzeug ist, desto weniger Oberflächenstörungen zeichnen sich an der Bauteiloberfläche ab.

Textilglasmatten sind nicht-gewebte Flächengebilde aus regellos liegenden E-Glas-Spinnfäden, die durch einen Binder verklebt sind. In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Typen von Glasfasermatten in verschiedenen Flächengewichten untersucht: Schnittglasmatten und Endlosglasmatten. Diese unterscheiden sich durch den Herstellungsprozess, der zu unterschiedlichen Faserlängen führt. Die untersuchten Mattentypen weisen zum Erreichen guter Oberflächenqualität besonders dünne Faserbündel und eine gleichmäßige Verteilung der Fasern über die Fläche auf.

Die Endlosglasmatten werden direkt aus den Spinnfäden durch regelloses Abliegen hergestellt und haben endlose Glasfäden mit einem Fadendurchmesser von  $24\ \mu\text{m}$ . Bei den Schnittmatten hingegen werden die Spinnfäden mit einem Durchmesser von nur  $12\ \mu\text{m}$  vor dem Ablegen zu Stapelfasern mit einer Länge von  $250\ \text{mm}$  geschnitten. Beide Mattenarten sind mit einem pulverförmigen Binder versehen, der das Flächengebilde zusammenhält und ein Preformen der Matten im Thermoform-Verfahren ermöglicht. Auch das Flächengewicht der Textilglasmatten kann variiert werden. Um auf das für die Kernschicht notwendige Flächengewicht zu kommen, werden die Glasfasermatten mit den Flächengewichten  $375\ \text{g/m}^2$ ,  $450\ \text{g/m}^2$  und  $2 \times 225\ \text{g/m}^2$  eingesetzt.

In Abbildung 4.25 ist je ein beispielhaftes Schlibbild von jedem Mattentyp gezeigt. Es fällt auf, dass bei der Endlosglasmatte die Faserbündelung viel stärker ist. So entstehen Bereiche, in denen mehrere Faserbündel übereinander liegen und so einen höheren Faservolumengehalt in Dickenrichtung erzeugen und ebenso Bereiche mit besonders wenigen Faserbündeln. Bei der Schnittmatte hingegen ist die Faserverteilung gleichmäßiger, da die Faserbündel kleiner sind und sich aufgrund der geschnittenen Fasern auch flacher ineinander legen können.

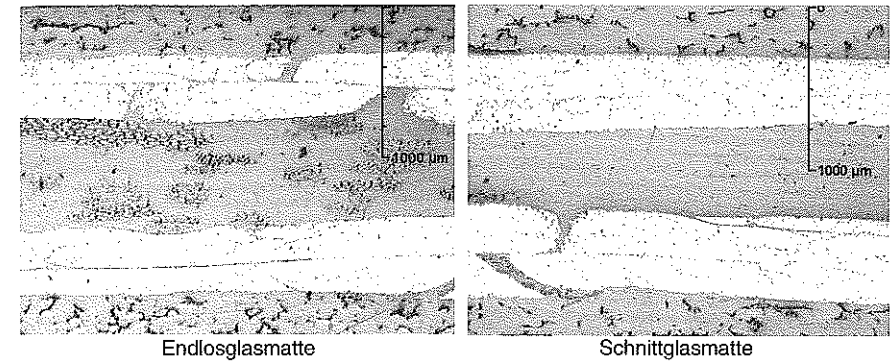


Abbildung 4.25: Schlibbilder mit verschiedenen Textilglasmatten im Bauteilkern

Bei bestimmten Schrumpfverhältnissen und starker Struktur der Glasfasermatten kann sich die ungleichmäßige Faserverteilung an der Bauteiloberfläche auswirken. Die Faserbündel zeichnen sich bei den Endlosglasmatten in Erhebungen bogenförmig über die gesamte Bauteiloberfläche verteilt ab, besonders stark an Kreuzungspunkten. In Bereichen mit geringem Glasanteil kommt es zu Einfallstellen. Diese Störungen sind mit dem Auge als langwellige Störungen leicht erkennbar. Sie bewirken auch eine Verschlechterung der gemessenen LW-Werte im Vergleich zu den Schnittmatten, wie in Abbildung 4.26 gezeigt. Hier sind in einem direkten Vergleich die Versuche nebeneinander dargestellt, bei denen alle weiteren Einflussgrößen gleich sind. Da die Schnittglasmatten aus Fasern mit einem geringeren Durchmesser von  $12\ \mu\text{m}$  hergestellt sind und eine feinere Faserverteilung haben, sind die gemessenen SW-Werte ebenfalls geringer als bei den Endlosglasmatten (siehe Abbildung 4.27).

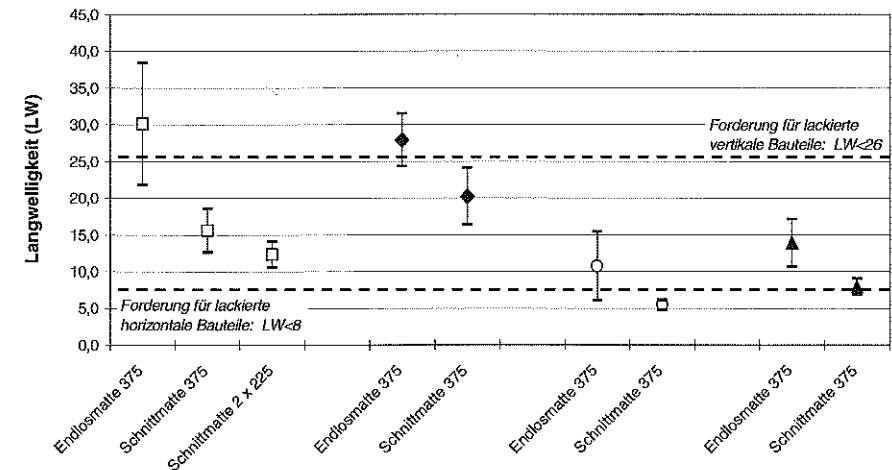
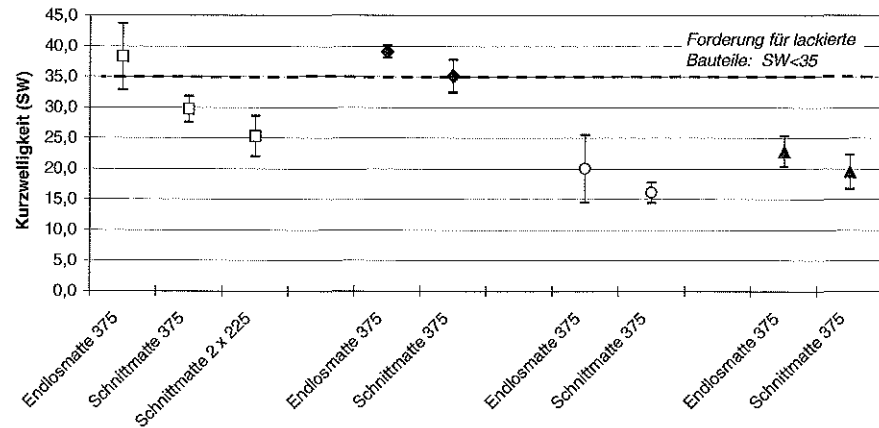


Abbildung 4.26: Vergleich der Langwelligkeit bei Verwendung verschiedener Textilglasmatten



**Abbildung 4.27:** Vergleich der Kurzwelligkeit bei Verwendung verschiedener Textilglasmatten

Bei gleichem Flächengewicht und ähnlichen mechanischen Eigenschaften führen also die Schnittglasmatten zu einer höheren Oberflächenqualität. Allerdings kann es auch hier Einschränkungen in einigen RTM-Prozessschritten geben. So zeigen die Schnittglasmatten ein anderes Umformverhalten als die Endlosglasmatten. Weiterhin kann es im Injektionsprozess mit hohen Drücken leichter zu einem Verschieben der Glasfasern kommen, da der Zusammenhalt der Einzelfasern nicht so stark wie bei den Endlosmatten ist und hauptsächlich über den Binder erzeugt wird.

#### 4.4.2 Fazit

Die Struktur der Textilglasmatten im Kern des Lagenaufbaus zeichnet sich trotz der darüber liegenden Kohlenstoffaserverstärkung und der Oberflächenvliese an der Bauteiloberfläche ab. Ebenso wie bei den anderen Halbzeugen aus gerichteten Fasern gilt: Je größer die Unterschiede zwischen faser- und matrixreichen Regionen in der Kernschicht sind, desto stärker sind die Abzeichnungen an der Oberfläche. Um diese Abzeichnungen zu vermeiden, ist also eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Glasfasern zielführend. Diese ist bei der Verwendung von Schnittfasermatten mit kleinerem Faserdurchmesser besser als bei Endlosfasermatten, wie an den gemessenen LW-Werten klar ersichtlich ist. Die an der Oberfläche gemessenen Langwelligkeitswerte können so z.B. von  $LW > 26$  auf  $LW < 15$  oder von  $LW > 11$  auf  $LW < 8$  reduziert werden. Deshalb werden für die nachfolgenden Betrachtungen die zielführenden Schnittglasmatten eingesetzt.

#### 4.5 Oberflächenvliese

Der Einsatz von Oberflächenvliesen zur Verbesserung der Oberflächenqualität zählt in der GFK-Industrie zum Stand der Technik. Bereits in vorangegangenen Arbeiten [32] wurde der Einfluss von einigen Oberflächenvliesen auf die Oberflächenqualität untersucht. So ist unbestritten, dass durch den Einsatz eines geeigneten Oberflächenvlieses die Oberflächenqualität erheblich verbessert werden kann. Insbesondere die Bildung und der Transport von Luftblasen während des Injektionsprozesses werden dadurch beeinflusst. Welche Mechanismen in welcher Stärke bei der Verwendung von Oberflächenvliesen zur Verbesserung der Oberflächenstruktur führen, bleibt allerdings ungeklärt.

Weitaus größere Anwendungsbereiche für Vliesstoffe liegen in der Bekleidungs- und Hygieneindustrie sowie bei der Herstellung von Filtern und Batterien, was zu einer enormen Vielfalt hinsichtlich der oben genannten Merkmale führt. Um die Auswirkungen auf die Oberflächenqualität zu ermitteln, werden zusammen mit verschiedenen Herstellern Vliesstoffe ausgewählt, die für eine Verwendung als Oberflächenvlies im RTM-Verfahren in Frage kommen. Dabei zeigen die Vliese große Unterschiede hinsichtlich entscheidender Merkmale:

- eingesetzte Fasermaterialien (Rohstoff, Faserdurchmesser...)
- Flächengewicht
- Herstellungsverfahren (Ablegen, Verdichten, Fixieren)
- Faserorientierung, und -kräuselung
- eingesetzter Binder
- Dicke, Bauschigkeit, Faservolumengehalt
- Umformbarkeit, Drapierbarkeit, Dehngrenze

Zu den Faserwerkstoffen, aus denen Vliesstoffe hergestellt werden, zählen unter anderem Polyacrylnitril (PAN), Polyethylen (PE), Cellulose und Polyester (PES), aber auch typische Verstärkungsfasern wie Glas (G) und Kohlenstoff (C). Im Gegensatz zu Geweben oder Geleugen können Vliesstoffe direkt aus den Fasern hergestellt werden. Der Herstellungsprozess hat nicht die bei der Gewebe- oder Geleugeherstellung notwendigen Vorprodukte Faden oder Garn. Zunächst wird im Schritt der Vliesbildung der sogenannte Faserflor als lockeres textiles Flächengebilde aus den Fasern hergestellt. Dies kann in verschiedenen Techniken aus kurzen Stapelfasern oder aus endlosen Spinnfasern erfolgen. Im Trocken- und im Nassvliesverfahren werden kurze Stapelfasern fein verteilt auf ein Förderband aufgebracht und als fortlaufender Faserflor abtransportiert. Im Spinnvliesverfahren werden Einzelfäden direkt aus dem aufgeschmolzenen Rohstoff durch dünne Düsen versponnen und auf das Förderband abgelegt. Der Arbeitsschritt der Vliesbildung beeinflusst mit dem ausgewählten Material, der Faserdicke und der Ablegetechnik entscheidende Merkmale des Vliesstoffes.

Nach der Vliesbildung folgt die Vliesverfestigung, in der aus dem noch lockeren Faserflor durch verschiedene Techniken ein festes textiles Flächengebilde hergestellt wird. Im Bindemittelverfahren erfolgt die Fixierung des Flors durch Verkleben mit einem Binder. Sind die Fasern

schmelzbar, können sie mit der thermischen Verfestigung über heiße Walzen miteinander verschweißt werden. Neben dem Verkleben und Verschmelzen ist auch eine mechanische Verfestigung des Faserflors möglich. Nadelvliese entstehen durch das Durchstoßen des Faserflors mit Nadeln, welche mit Widerhaken versehen sind. Bei der Wasserstrahlverfestigung kommen anstelle der Nadeln sehr fein gebündelte Wasserstrahl-Stöße zum Einsatz, bei der Luftvermadelung eng gebündelte Luftstöße. Die Art der Vliesverfestigung hat entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit des Flächengebildes, die Struktur des Vliesstoffes und die Lage der Fasern.

#### 4.5.1 Oberflächenqualität mit verschiedenen Oberflächenvliesen

Vliesstoffe werden bei Bauteilen aus FVK eingesetzt, um an der Bauteilaußenseite eine matrixreiche Oberflächenschicht zu erzeugen. In erster Linie soll die Abzeichnung der Faserstrukturen an der Oberfläche verhindert werden. Für den RTM-Prozess sind noch weitere Eigenschaften der Vliesstoffe von Bedeutung. Da die oberste Schicht des Preforms aus Vliesstoff besteht, muss das Matrixmaterial diese Schicht sauber und ohne die Bildung von Luft einschließen infiltrieren. Die Permeabilität der Vlieschicht im Vergleich zu den übrigen Schichten des Lagenaufbaus ist wichtig für die Form der Fließfront über der Kavitätstiefe. Die Fasermaterialien, Faserschichten und eingesetzten Binder des Vlieses müssen verträglich zum Matrixmaterial sein. Das Vlies muss die mechanischen Belastungen und die Temperaturen, die im Preformen und im RTM-Verfahren auftreten, ohne Schaden überstehen. Insbesondere das Preformen stellt hohe Anforderungen an die Dehnbarkeit und Drapierbarkeit der Oberflächenvliese.

Die Dicke und der Faservolumengehalt in der Vlieschicht lässt sich nicht direkt aus dem vorliegenden Vliesstoff ermitteln. Die Einzellagen mit Kernmaterial, Verstärkungshalbzeug und Oberflächenvlies wirken bei der Komprimierung vielmehr wie ein Paket aus Einzelfedern mit verschiedenen Federkonstanten. Beim Schließen des Werkzeugs und Komprimieren des Lagenstapels auf Kavitätshöhe ist die Kompressionskraft auf alle Einzellagen gleich. Entsprechend der unterschiedlichen Federkonstanten stellen sich so bei einem Kraftniveau verschiedene Dicken für die verschiedenen Lagen ein. Die Gelege aus Kohlenstoffasern sind bereits bei der Herstellung sehr dicht abgelegt und weisen einen hohen Faservolumengehalt auf. Die Vliesstoffe hingegen haben vor und nach der Kompression einen relativ niedrigen Faservolumengehalt. Dies wird durch die Bauschigkeit der Vliesstoffe bewirkt, die durch den Anteil der Fasern in z-Richtung und die Faserkräuselung bestimmt wird.

So ergeben sich für verschiedene Vliesstoffe selbst mit gleichem Flächengewicht unterschiedliche Schichtdicken und Faservolumenanteile der Vlieschicht, wie in Abbildung 4.28 gezeigt ist.

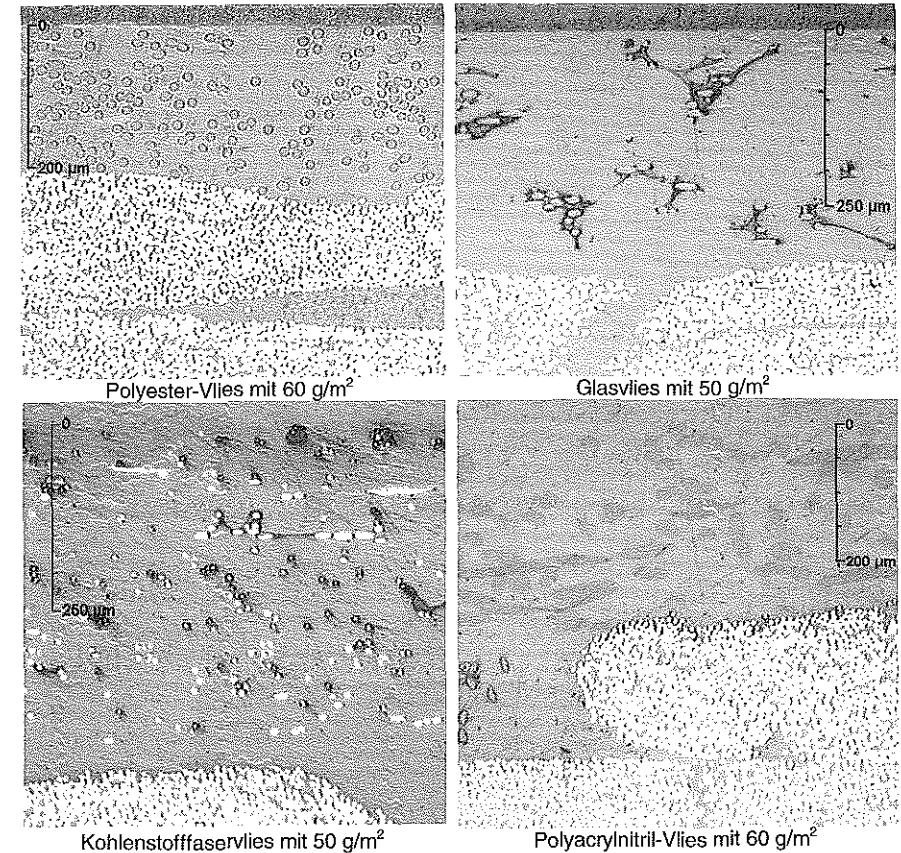


Abbildung 4.28: Verschiedene Vliestypen im Schliffbild

Die Oberflächenvliese zeigen sehr große Unterschiede in der erzeugten Oberflächenstruktur an der Bauteiloberfläche, wie Abbildung 4.29 zeigt. So zeichnet sich bei einigen Vliesen die Faserstruktur aufgrund zu großer Faserdurchmesser oder Bündelung der Fasern ab. Die darunter liegende Verstärkungsstruktur in  $+45^\circ$ -Richtung kann auch nicht ausreichend abgedeckt werden und bleibt deutlich sichtbar. Ebenso in Abbildung 4.29 gezeigt ist ein Oberflächenvlies, dessen eigene Faserstruktur nicht mehr zu erkennen ist, wohl aber die Abzugsrichtung des Verfestigungsprozesses. Die Abzeichnung des Verstärkungshalbzeugs wird hier schwach abgedeckt. Weiterhin sind aber die Oberflächenstrukturen aufgrund von Störungen im Gelege („Augenbildung“) vorhanden.

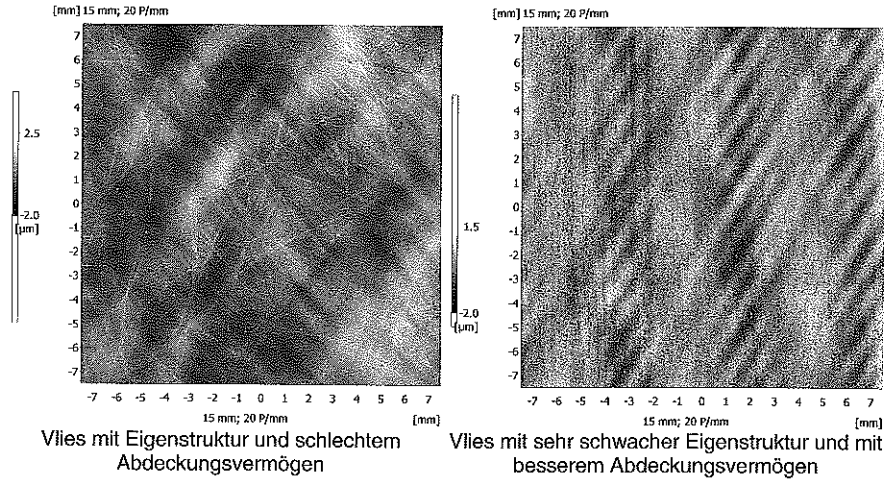


Abbildung 4.29: Laserprofilometer-Bild von zwei verschiedenen Oberflächenvliesen

Ein anderes Oberflächenvlies mit sehr gutem Abdeckungsvermögen ist in Abbildung 4.30 gezeigt. Die  $+45^\circ$ -Abzeichnung der Verstärkungshälbzeuge wird fast komplett abgedeckt. Die Eigenstruktur des Vlieses selbst zeichnet sich nicht an der Bauteiloberfläche ab.

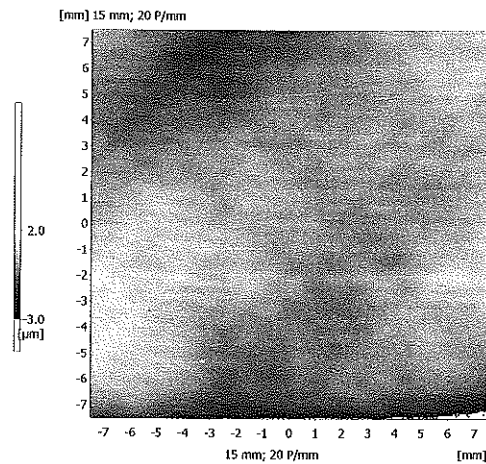


Abbildung 4.30: Laserprofilometer-Bild eines besonders guten Oberflächenvlieses

Das Abdeckungsvermögen der Oberflächenvliese wird sehr gut durch die gemessene Langwelligkeit wiedergegeben. Bei großer Amplitude, also schlechter Abdeckung, ist der LW-Wert hoch, bei niedriger Amplitude und guter Abdeckung hingegen niedrig. Dieser Zusammenhang zeigt jedoch nicht, in welcher Form die Oberflächenstörungen vorliegen oder ob sie regelmäßig

sind. Bei gleichen Verstärkungs- und Kernmaterialien sind aber die gleichen Oberflächenstrukturen, wenn auch in unterschiedlicher Amplitude, zu erwarten.

Zur Erzeugung der matrixreichen Oberflächenschicht können einzelne oder mehrere Vliese verwendet werden oder sogar Kombinationen zweier verschiedener Vliestypen. Werte von 50 bis 120 g/m<sup>2</sup> haben sich für das Gesamt-Flächengewicht als praktikabel herausgestellt. Bei höheren Flächengewichten entstehen andere Oberflächenstörungen aufgrund einer sehr dicken matrixreichen Schicht, während bei zu niedrigen Flächengewichten das Abdeckungsvermögen zu sehr absinkt.

Abbildung 4.31 zeigt einen Vergleich der gemessenen Langwelligkeit für ausgewählte Oberflächenvliese bei sonst gleichen Versuchsbedingungen und Materialien. Die Kurzwelligkeit, in Abbildung 4.32 gezeigt, verhält sich gleichermaßen. Einige Vliesstoffe zeichnen sich als effektive Maßnahme zur Verbesserung der Oberflächenqualität aus. Ihr Einsatz verringert die Langwelligkeit im Vergleich zu Standard-Materialien von LW>20 auf LW<10 und die Kurzwelligkeit von vorher SW<35 auf SW<15. Obwohl sie aus verschiedenen Fasermaterialien bestehen, in verschiedener Ablege- und Verfestigungsmethode hergestellt werden und deshalb unterschiedliche Steifigkeit und Bauschigkeit haben, führen sie gleichermaßen zu niedrigen Werten für die Lang- und Kurzwelligkeit. Die eingesetzten Flächengewichte reichen dabei von 22 bis 120 g/m<sup>2</sup>.

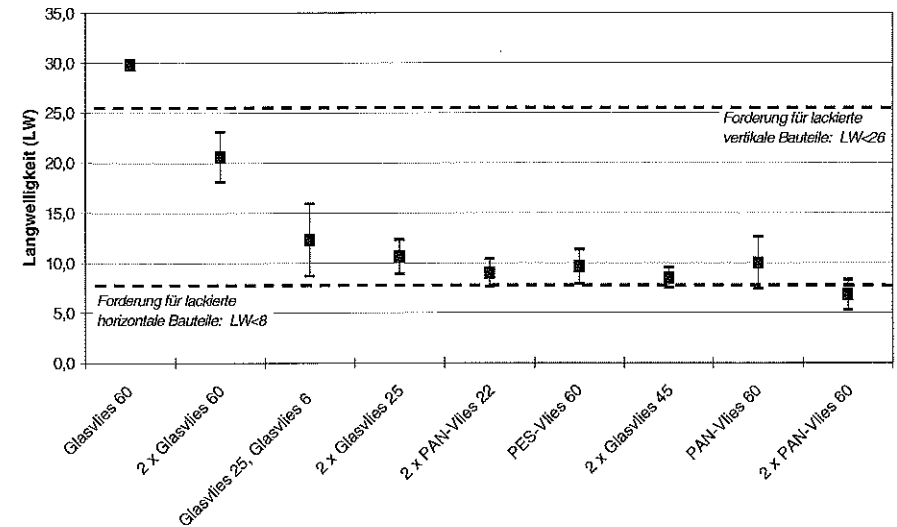


Abbildung 4.31: Vergleich der Langwelligkeit für verschiedene Oberflächenvliese

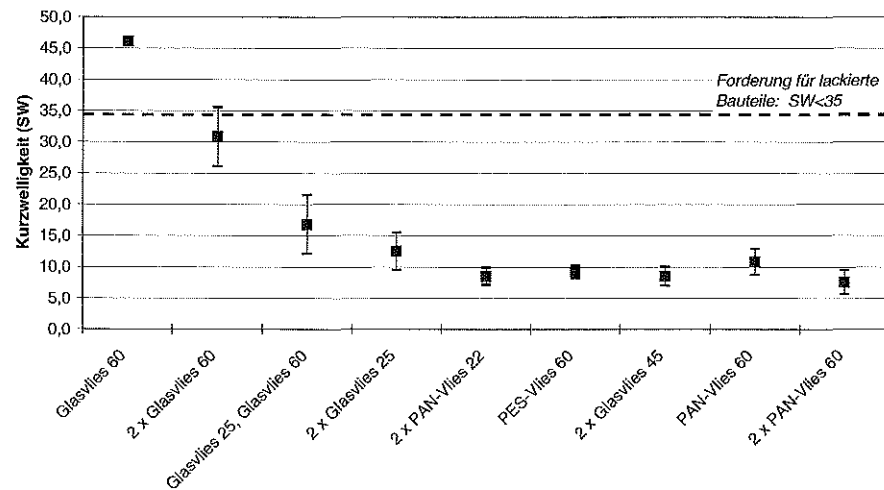


Abbildung 4.32: Vergleich der Kurzwelligkeit für verschiedene Oberflächenvliese

Diese Vliese haben folgende Merkmale gemeinsam: Die Fasern haben einen kleinen Durchmesser und liegen als Einzelfasern vor. Eine Faserbündelung hingegen führt zu Abzeichnungen an der Oberfläche. Die Fasern sollten gleichmäßig und fein verteilt vorliegen, was vom Fasermaterial und der Art des Vlieses abhängt, sei es ein Stapelfaservlies oder ein Spinnvlies. Die Vliesbildung und -verfestigung muss so erfolgen, dass keine regelmäßigen Strukturen im Vlies entstehen, z.B. durch Vernadelung in Linien. Eine geeignete Fixierung durch Binder oder regellos verteilte Luftverdichtung ist nachher nicht an der Bauteiloberfläche sichtbar. Vliestypen, die durch Verwirken mit einem Wirkfaden fixiert werden, sind nicht zielführend.

Die Versuchsdaten wurden mit Hilfe des Auswertungssystems auf Einflussgrößen auf die Lang- und Kurzwelligkeit untersucht. Dabei zeigten sich zunächst keine oder nur sehr kleine Signifikanzen für die Merkmale Binder, Fasermaterial und Lagenanzahl für die Langwelligkeit. Die Kurzwelligkeit allerdings wird in hohem Maße durch diese Merkmale des Oberflächenvlieses beeinflusst. Die Vliese aus Polyacrylnitril und Kohlenstoff, und die Kombination hieraus, ergeben wesentlich niedrigere Werte für die Kurzwelligkeit als die Vliese aus Glas- oder Polyesterfasern. Dabei sollte das Flächengewicht zwischen 50 und 80 g/m<sup>2</sup> liegen. Da bei der Vliesverfestigung die Verwendung von Bindern die Werte für die Kurzwelligkeit verschlechtert, sind mechanische Verfestigungsverfahren vorzuziehen.

#### 4.5.2 Fazit

Auch wenn sich eine Korrelation der Vliesstoffeigenschaften zur erreichbaren Oberflächenqualität als äußerst schwierig gestaltet, sind aufgrund der Versuchsergebnisse im Direktvergleich Aussagen zur Verbesserung der Oberflächenqualität möglich. Um aus der Vielzahl der möglichen zielführenden Vliese und deren Kombinationen die richtige Auswahl zu treffen, sind

Kriterien aus dem RTM-Verfahren und dem Preformen zu beachten, insbesondere die Drapierbarkeit und die Temperaturbelastung. Weiterhin kann festgehalten werden, dass einige der am Markt erhältlichen Oberflächenvliese für FVK-Anwendungen nicht die gewünschten Verbesserungen bieten, während dies mit einigen Vliesstoffen aus völlig anderen Anwendungsbereichen möglich ist.

In der Kombination der Anforderungen an Oberflächenqualität und Verarbeitbarkeit sind insbesondere zwei Vliestypen zielführend, ein binderfixiertes Glasvlies mit ca. 50 g/m<sup>2</sup> und ein PAN-Vlies mit ca. 80 g/m<sup>2</sup>. Diese beiden Vliestypen können im Preform-Schritt für ein dreidimensionales Bauteil mit umgeformt werden und bieten so im Hinblick auf einen serientauglichen RTM-Prozess das größte Potenzial zur Verbesserung der Oberflächenqualität.

#### 4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Materialoptimierung zur Verbesserung der Oberflächenqualität umfasste das einzusetzende Matrixsystem und die Faserhalbzeuge, bestehend aus Faserverstärkung, Kernmaterial und Oberflächenvlies. Das Faserabzeichnen an der Bauteiloberfläche ist ursächlich auf folgenden Effekt zurückzuführen: Die Faserhalbzeuge verursachen durch ihren unregelmäßigen Aufbau lokale Störungen im Faservolumengehalt, die sich dann bei der Verarbeitungsschwindigkeit des Matrixsystems an der Bauteiloberfläche abzeichnen. Deshalb sind alle eingesetzten Materialien ursächlich an dem Phänomen Faserabzeichnen beteiligt.

Zunächst wurden fünf verschiedene EP-Harzsysteme nach speziellen Anforderungen ausgewählt, die aus der gewünschten Serienanwendung in der Fahrzeug-Außenhaut erwachsen. Diese Harzsysteme wurden in RTM-Versuchen im Plattenwerkzeug mit einem Standard-Lagenaufbau in Versuchsreihen verarbeitet, um sie in einem stabilen Prozessfenster hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenqualität und Zykluszeit zu vergleichen. Für alle Harzsysteme wurde mit einem Regressionsmodell die Abhängigkeit der erreichten Glasübergangsstufe von der Aushärtetemperatur und -zeit ermittelt. Die Harzsysteme A1 und B2 zeigten dabei eine schnellere Aushärtung als die anderen Harzsysteme. Für eine Beurteilung der Oberflächenqualität wurde die gemessene Langwelligkeit herangezogen. Sowohl beim Vergleich nach gleichen Aushärtetemperaturen als auch nach gleichem erreichten T<sub>g</sub> erzeugten die Systeme A1 und B2 die besseren Ergebnisse. Aufgrund der höheren Oberflächenqualität und der Fähigkeit, innerhalb kurzer Aushärtezeiten ausreichend hohe T<sub>g</sub> zu erreichen, wurden diese beiden EP-Systeme für die weiteren Untersuchungen in den folgenden Kapiteln ausgewählt.

Bei der Betrachtung der Oberflächenqualität von Musterteilen mit verschiedenen Verstärkungshalbzeugen wurden die Gewebe aufgrund ihrer starken und regelmäßigen Eigenstruktur am schlechtesten bewertet. Auch wenn verschiedene Maßnahmen diesen Effekt mildern können, zeichnet sich die Gewebestruktur für das Auge gut sichtbar in einem „Schachbrettmuster“ an der Oberfläche ab.

Besser wurden die verwirkten Multiaxialgelege (WIMAG) bewertet. Durch die Entwicklung abgestimmter Gelegetypen mit der Variation der Bindungsart, Bindungsdichte, Wirkfadenart und Ablegetechnik konnte in der vorliegenden Arbeit ein neuer zielführender Gelegetyp identifiziert werden, mit dem die Oberflächenanforderungen am besten erfüllt werden. Das Auflösen von Wirkfäden wurde als neuartige Methode zum Vermeiden der Oberflächenstörungen durch das Verwirken entwickelt und erstmalig an Musterbauteilen im RTM-Verfahren umgesetzt. Dieses Herauslösen der Wirkfäden vor oder während des RTM-Prozesses hat bei weiterer Verfahrensentwicklung mittelfristig großes Potenzial zum Erreichen der Class-A-Qualität.

Eine Fixierung ohne störende Einstichlöcher konnte bei den verklebten UD-Gelegen und deren multiaxialen Kombinationen gefunden werden. Durch eine sehr gleichmäßige, flächige Faser-Verteilung kann eine fast störungsfreie Oberfläche des RTM-Bauteils erreicht werden. Dabei ist auf die einseitige Fixierung und bestimmte Höchsttemperaturen bei der Verarbeitung zu achten. Aufgrund der Problematik bei Tränkung, Handhabung und insbesondere Umformung auf eine dreidimensionale Bauteilgeometrie bieten diese Gelege nur bei bestimmten Anwendungen eine kurzfristige Lösung. Über eine Weiterentwicklung des Preformings für diese Halbzeuge zeichnet sich mittelfristig eine Lösung für Class-A-Oberflächen ab.

Im Folgenden werden vor allem die verwirkten Multiaxialgelege für weitere Betrachtungen herangezogen. Sie stellen derzeit den besten erreichbaren Stand bei Betrachtung aller Anforderungen an Oberflächenqualität, Umformbarkeit, Tränkbarkeit, Handhabung und Wirtschaftlichkeit dar.

Der Einsatz von Oberflächenvliesen ist zum Erreichen hoher Oberflächenqualität unabdingbar. Dabei bieten sich zahlreiche Variationen des Fasermaterials, des Flächengewichts, der Vliesherstellung und -fixierung an, welche in den RTM-Versuchen zu sehr unterschiedlichen Oberflächenqualitäten der Musterbauteile führten. So konnten zwei Oberflächenvliese aus Glas und PAN mit Flächengewichten von 50 und 80 g/m<sup>2</sup> aufgrund des guten Abdeckungsvermögens bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit und Umformbarkeit als zielführend identifiziert werden.

## 5 Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität

Die Anzahl der Einflussgrößen auf die Oberflächenqualität ist groß und führt bei der Erfassung aller möglichen Kombinationen zu sehr großen Versuchsplänen mit hohem Versuchsaufwand. Die Abarbeitung der Variationsmöglichkeiten bei der Veränderung nur eines Faktors auf einmal (engl. „one factor at a time“, OFAT-Methode) bietet zwar eine Lösung, vernachlässigt aber alle Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen. Diese sind aber ein wichtiger Bestandteil des beobachteten Systemverhaltens. Zudem stören Messfehler und unbekannte Störgrößen bei der Erkenntnisgewinnung.

Auch wenn die Faserabzeichnungen an der Oberfläche durch physikalische und chemische Vorgänge hervorgerufen werden, ist aufgrund der Vermischung und gegenseitigen Beeinflussung der Effekte eine Reduktion auf ein einfaches Gleichungssystem nicht möglich. Der Ansatz, die Oberflächeneffekte aufgrund der verschiedenen Volumenschwindung des Matrixmaterials und des Fasermaterials in diskreten Volumenelementen mittels der FEM zu berechnen, kann nur für bestimmte Randbedingungen gelten. Im vorliegenden Fall ist z.B. die Lage der Faserhalbzeuge zueinander nicht ausreichend bekannt, und auch der Reaktionsverlauf der hochreaktiven EP-Systeme kann nicht mit ausreichender Präzision vorhergesagt werden. Daher ist die Beschreibung dieser Zusammenhänge mittels naturwissenschaftlicher Gesetze (z.B. aus der Mechanik, Thermodynamik oder Reaktionskinetik) aufgrund der Randbedingungen und der Komplexität der Prozesse nicht möglich.

Bei solchen vernetzten Problemstellungen mit zusätzlicher Verrauschung der Zielgrößen bieten sich die statistischen Verfahren zur Erfassung der Zusammenhänge an. Basierend auf den statistischen Methoden zur Versuchsplanung und Auswertung werden im Folgenden die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen aus der Verfahrenstechnik und den Zielgrößen für die Oberflächenqualität erarbeitet. Der RTM-Prozess wird im Folgenden als „Black Box“ behandelt, welche die Zusammenhänge zwischen Einfluss und Zielgrößen verursacht. Das Verhalten dieser Black Box wird durch ein mathematisches Modell beschrieben, das sowohl die Zielgrößen als Funktionen der Einflussgrößen als auch die auftretenden Abweichungen vom Modell erklärt. In Anhang G werden die statistischen Methoden zur Versuchsplanung und -auswertung kurz vorgestellt. Eine ausführliche Behandlung der Themen Qualitätsmanagement, Systemoptimierung und Versuchsplanung ist in der Fachliteratur zu finden (siehe [7], [93], [110] und [72]). Die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Methoden sind insbesondere in [122] und [60] beschrieben.

### 5.1 Systemanalyse für den RTM-Prozess

Die Systemanalyse bildet die Grundlage der statistischen Versuchsmethodik. Der RTM-Prozess kann als System mit den in Abbildung 5.1 angegebenen Einfluss, Stör- und Zielgrößen angenommen werden. Dabei gelten als Prämissen:

- Herstellung von monolithischen Bauteilen geringer Dicke
- optimal operierende Anlagentechnik (Injektionsanlage, Schließereinheit...)
- Beherrschung des Füllvorgangs, vollständige Bauteilfüllung
- Verträglichkeit der eingesetzten Materialien untereinander (z.B. Trennmittel-Harz)

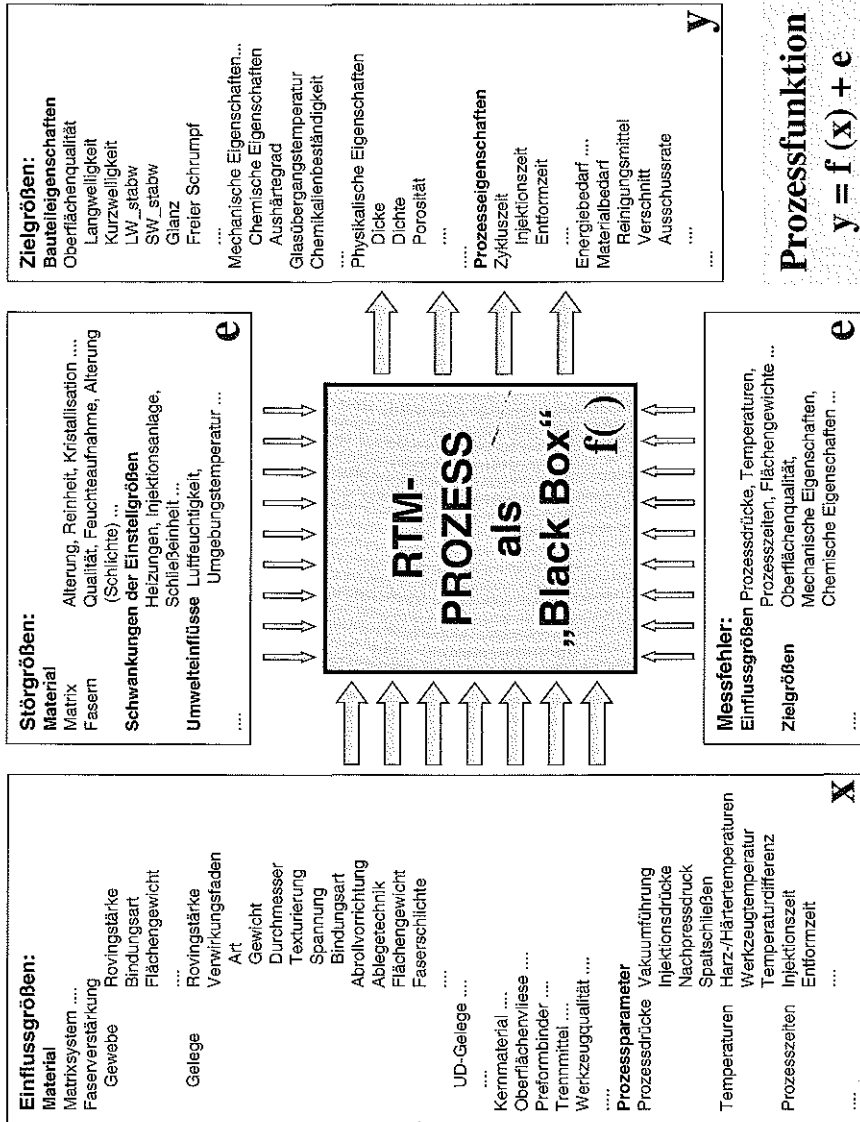


Abbildung 5.1: RTM-Prozess als System mit Einfluss, Stör-, und Zielgrößen

Diese Darstellung bleibt aufgrund der Vielzahl von messbaren und nicht messbaren Größen unvollständig. So hat z.B. allein das Merkmal Materialien\Faserverstärkung\Gelege\Wirkfaden mehrere Parameter mit Einfluss auf die Bauteilqualitäten, wie Fadenart, -material, -spannung und -texturierung.

Von den angegebenen Zielgrößen ist die Oberflächenqualität entscheidend, unter Erreichung bestimmter Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften, Aushärtegrad und T<sub>g</sub>. Zwischen den Einflussgrößen bestehen zahlreiche Abhängigkeiten und Einschränkungen. Bei vorgegebenen Faserhalbzeugen und vorgegebenem Matrixsystem bildet sich z.B. für den Injektionsvorgang ein Prozessfenster aus Temperatur und Zeit. Weiterhin gibt es Begrenzungen für den Injektionsdruck aus der Injektionsanlage, der Schließereinheit und der Verschieblichkeit der Halbzeuge im Werkzeug. Ebenso bilden die Forderungen nach Entformbarkeit und einem Mindest-T<sub>g</sub> Einschränkungen für die Entformzeit in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur.

Die Auswirkungen verschiedener Materialien für Fasern und Matrix sind in Kapitel 4 bereits untersucht worden. Von bereits gewonnenen historischen Daten wurde mit der statistischen Versuchsauswertung ein vollquadratisches Prozessmodell mit Einflussgrößen aus 15 Materialmerkmalen und 9 Verfahrensparametern gebildet. Dabei haben sich die Wechselwirkungen zwischen den Materialmerkmalen und den Verfahrensparametern als nicht signifikant herausgestellt. Aufgrund der mangelnden Signifikanz dieser Wechselwirkungen zwischen Material- und Verfahrensmerkmalen können deshalb die Einflussgrößen des RTM-Verfahrens separat in einer Versuchsplanung und -auswertung untersucht werden. Die Erwartung ist, dass die hier ermittelten Erkenntnisse für alle in Kapitel 4 untersuchten Faserverstärkungen, Kernmaterialien und Oberflächenviskosität gleichermaßen gelten.

Die Verfahrensparameter im RTM-Prozess haben primär Einfluss auf die chemische und thermische Schwindung des Matrixsystems. Die Schwindung erzeugt zusammen mit der inhomogenen Faserdistribution die Abzeichnung der Faserstrukturen an der Oberfläche. Die Oberflächenstruktur wird dabei in ihrer Form und Wellenlänge durch die Faserhalbzeuge vorgegeben und tritt je nach Schwindung in unterschiedlicher Stärke hervor. Daher bieten sich zu einer Untersuchung des Schwindungsverhaltens und der zu erwartenden Oberflächengüte die mit dem Wave-Scan-Plus messbaren Werte für Lang- und Kurzzeitigkeit an, welche die Amplituden der Oberflächenstörungen erfassen.

Aus den Erfahrungen der Vorversuche und Materialversuche wurden fünf Einflussgrößen und fünf Zielgrößen definiert (siehe Tabelle 5.1). Diese fünf ausgewählten Prozessparameter haben entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenqualität und bestimmen in großem Maße den Ablauf und die Eigenschaften des RTM-Prozesses. Bei den anschließenden Betrachtungen wurden die anderen Einflussgrößen konstant gehalten. Neben den eingesetzten Materialien (wie Faserhalbzeuge, Matrixsystem...) und Anlagen (wie Injektionsanlage, RTM-Werkzeug...) waren auch die anderen Prozessparameter (wie Nachpressen, Spalthöhe...) für diese Versuche gleich. Die Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Zielgröße T<sub>g</sub> werden getrennt in Kapitel 5.7 betrachtet.

Tabelle 5.1: Einfluss- und Zielgrößen für die Analyse des RTM-Verfahrens

Einflussgrößen (Einheit)	Symbol	Zielgrößen (Einheit)	Symbol
Werkzeugtemperatur (°C)	WZ_T	Langwelligkeit (–)	LW
Temperaturdifferenz (°C)	Delta_T	Standardabweichung von LW (–)	LW_stabw
Vakuumbführung (bar)	Vak	Kurzwelligkeit (–)	SW
Nachdruck (bar)	N_Druck	Standardabweichung von SW (–)	SW_stabw
Entformzeit (sec)	E_Zeit	Glasübergangstemperatur (°C)	T <sub>g</sub>

## 5.2 Prozessstabilität

Zum Nachweis der Prozessstabilität und zur Verwendung für Lackierversuche wurde eine Gleichteile-Serie mit 27 Versuchen unter Verwendung der gleichen Materialien und unter exakt gleichen Prozessparametern hergestellt. Mit einer solchen Prozess-Serie kann die Versuchswiederholungs-Streuung ermittelt werden, die in Abbildung 5.2 für Langwelligkeit und Kurzwelligkeit dargestellt ist.

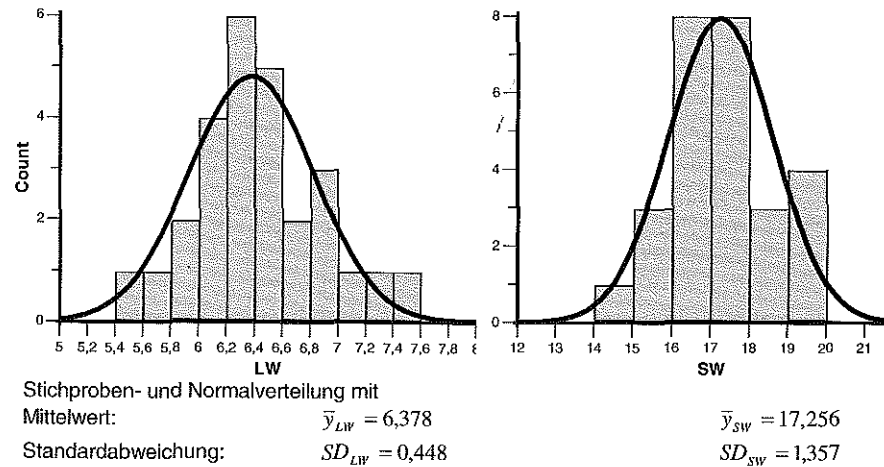


Abbildung 5.2: Histogramm der LW- und SW-Werte und Kennzahlen der Verteilungen für die Gleichteile-Serie

Die Streuungen der LW- und SW-Werte um den jeweiligen Mittelwert sind in etwa normalverteilt. Die Kennzahlen für die Stichprobenverteilung und die berechnete passende Normalverteilung sind ebenfalls angegeben. Die Streuungen der gemessenen Welligkeitswerte sind sehr gering, was durch die niedrige Standardabweichung ausgedrückt wird. Nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung liegen Folgeversuche mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in den Intervallen für die Kurz- und Langwelligkeit von  $5,482 < \bar{y}_{LW} < 7,274$  und  $14,542 < \bar{y}_{SW} < 19,970$  um die Mittelwerte.

Auch die Einflussgrößen selbst, wie Temperatur und Druck, sind mit Streuungen behaftet. Zu den tatsächlichen Schwankungen der Einflussgrößen kommen noch die Störgrößen und Messfehler hinzu (siehe auch Abbildung 11.5). Auch das Messverfahren für die Zielgrößen Lang- und Kurzwelligkeit mit dem Gerät Wave-Scan-Plus der Firma Byk-Gardner unterliegt selbst statistischen Schwankungen. Die Veränderung der Oberflächenqualität über der Musterplattenfläche ist mit unbekanntem oder nicht beeinflussbaren Einflussfaktoren begründet, z.B. durch:

- Abweichungen von einer homogenen Temperaturverteilung auf der Werkzeugoberfläche
- unterschiedliche Historie für Harz an verschiedenen Stellen auf Bauteiloberfläche (Injektion von einer Kavitätsseite her, Bereiche mit „jüngerem und älterem“ Harz)
- Schwankungen in der Oberflächenqualität der Werkzeugkavität

Daher wurden bei den Oberflächenkenngrößen außer den eigentlichen Mittelwerten für die Lang- und Kurzwelligkeit auch die Streuungen dieser Größen auf der Musterteilfläche betrachtet. Alle Wave-Scan-Messungen wurden nach dem gleichen Schema an 9 Stellen, die gleichmäßig über die Fläche der Musterplatten verteilt sind, durchgeführt. Von den gemessenen 9 Wertepaaren für LW und SW wurden dann jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen als Kennzahlen für die Oberflächenqualität eines Musterteils gebildet. Somit stehen die vier Werte für LW, LW\_stabw, SW und SW\_stabw für die Auswertung als Zielgrößen zur Verfügung. Die Standardabweichungen für die Lang- und Kurzwelligkeit geben die Gleichmäßigkeit der Oberflächenqualität über der Bauteiloberfläche wieder. LW\_stabw und SW\_stabw sind in den Direktvergleichen für die Materialien als Intervalle um den Mittelwert angegeben, da sie nicht nur Rückschlüsse auf die oben genannten Störfaktoren (Werkzeugqualität, Temperaturverteilung, Matrixgeschichte), sondern auch auf die Gleichmäßigkeit der verwendeten Halbzeuge zulassen.

## 5.3 Versuchsplanung und -durchführung

Zur Planung der notwendigen Versuche wurde die Statistik-Software Cornerstone, Version 3.0, der Firma Domain Manufacturing eingesetzt (siehe auch [121]). Dazu wurden die fünf Einflussgrößen und die 4 Zielgrößen für die Oberflächenqualität aus Tabelle 5.1 als quantitative, stetige Faktoren mit ihren Einstellbereichen und Einheiten definiert.

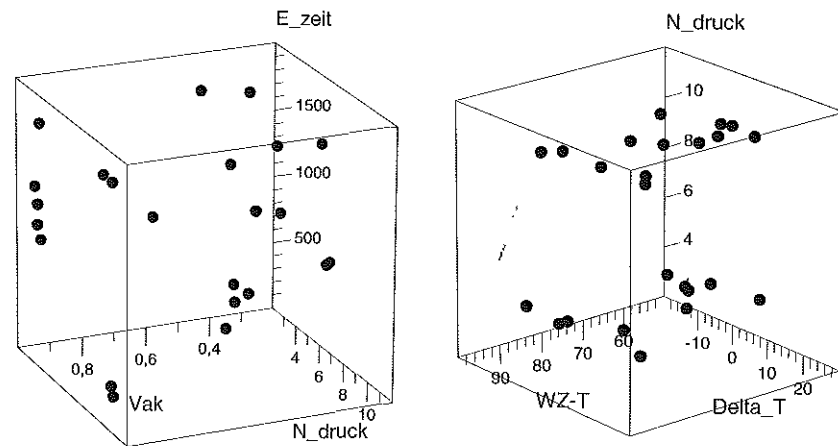
Anschließend erfolgte die Auswahl eines vollquadratischen Modellansatzes mit Berücksichtigung aller Zweifach-Wechselwirkungen. Dazu sind mindestens 3 Stützpunkte für jede Einflussgröße notwendig. Zur Verfeinerung des Modells und Verdichtung der Messpunkte für bestimmte Parameter wurden auch einige höhere Terme eingebaut. Anschließend produzierte das Programm eine Kandidatenmenge, die einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit allen möglichen Parameterkombinationen entspricht.

Nach der Auswahl des D-optimalen Versuchsplantyps optimiert und reduziert das Programm über Matrizenoperationen die Versuchsmenge so, dass eine optimale Versuchsraumabdeckung bei minimaler Versuchsanzahl gefunden wird. Für ein vollquadratisches Modell mit 5 Faktoren



hat ein vollfaktorieller Versuchsplan immerhin 243 Versuche, ein D-optimaler nur noch 26 Versuche. Davon sind 19 Versuche mindestens zur Ermittlung der 19 Koeffizienten des Funktionsansatzes notwendig und mindestens 5 zur akzeptablen Erklärung der auftretenden Streuungen, also zur statistischen Absicherung der ermittelten Koeffizienten.

Die RTM-Versuche wurden unter den vorgegebenen Faktoreneinstellungen unter Beibehaltung der anderen Einflussgrößen durchgeführt. Soweit möglich, wurden die Versuche randomisiert durchgeführt, damit zeitliche Effekte sich nicht mit den Einflüssen der Faktoren überlagern. Die Lage der Versuche im fünfdimensionalen Versuchsraum ist für jeweils drei Faktoren dreidimensional in Abbildung 5.3 dargestellt.



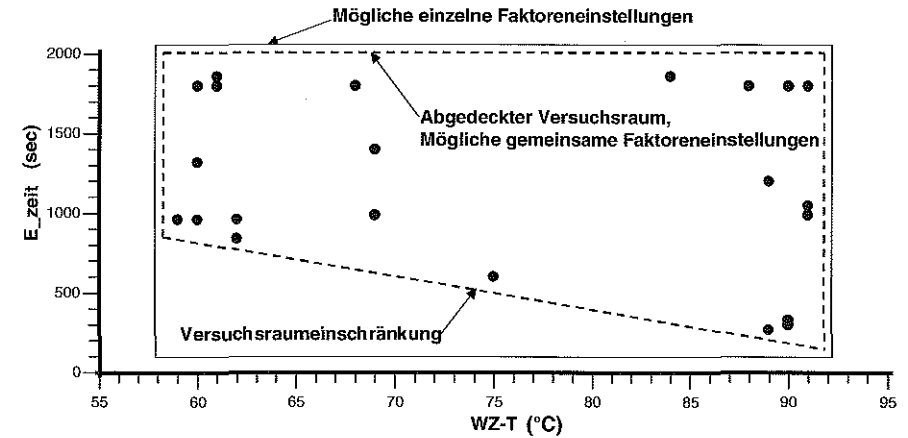
Versuchsraum für Vak, N\_druck, E\_zeit

Versuchsraum für WZ\_T, Delta\_T, N\_Druck

**Abbildung 5.3:** Lage der Versuche im Versuchsraum für je 3 Faktoren

Die Versuche sind so im Versuchsraum angeordnet, dass er möglichst gut abgedeckt wird. Während bei fast allen Faktoren mindestens 3 Niveaus vorhanden sind, liegen die Versuche auf nur 2 Niveaus für den Nachdruck. Die Auswirkungen dieser Einflussgröße wurden aufgrund des höheren anlagentechnischen Aufwandes gesondert in einer weiteren Versuchsreihe analysiert.

Bei den angegebenen Einflussgrößen besteht eine Versuchsraumeinschränkung hinsichtlich der Entformzeit und der Temperatur. So können nicht beliebig geringe Entformzeiten für gegebene Werkzeugtemperaturen erreicht werden, da das Matrixsystem noch nicht glasartig ausgehärtet, sondern noch gelartig ist. Daher ist der Versuchsraum für die zwei Einflussgrößen WZ\_T und EZ, als Fläche in Abbildung 5.4 dargestellt, an einer Ecke abgeschnitten.



**Abbildung 5.4:** Versuchsraumeinschränkung für Werkzeugtemperatur und Entformzeit

#### 5.4 Modellbildung mittels schrittweiser Regression

Aus den Versuchsdaten wurde für die Einfluss und Zielgrößen ein Regressionsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate erstellt. Der Modellansatz ist vollquadratisch mit allen möglichen Zweifach-Wechselwirkungen. Dies ergibt für jede einzelne der vier Zielgrößen fünf lineare und fünf quadratische Terme, sowie zehn Wechselwirkungen. Die Qualität der Regression ist im Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sowie dem adjustierten Bestimmtheitsmaß  $R_{adj}^2$  gegeben (siehe Tabelle 5.3). Die Koeffizienten der Taylorentwicklung werden nun auf ihre Signifikanz geprüft. Dabei entscheidet eine festgelegte Schwelle für den sogenannten p-Wert über Verbleiben im Modell oder Herausfallen (siehe Signifikanztabelle in Anhang H). Er gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Behauptung an, dass der Koeffizient von 0 abweicht. Wenn diese Irrtumswahrscheinlichkeit klein ist (z.B. < 5 % oder < 1 %, hier zur Sicherheit 10 %) kann man annehmen, dass der Parameter für die Funktion Bedeutung hat. Ist diese Wahrscheinlichkeit groß, so kann auf den Parameter in der Funktion verzichtet werden, indem er auf 0 gesetzt wird. Nach Entfernung des Koeffizienten aus dem Modell wird erneut eine Regression durchgeführt. In Schritten können so alle nicht-signifikanten Terme eliminiert und das Modell verfeinert werden, daher auch der Name „schrittweise Regression“.

Nach der schrittweisen Regression kann über Box-Cox-Diagramme die vorhergesagte Modellgüte für die möglichen Variablentransformationen analysiert werden. In dem vorliegenden Fall wurden deshalb die Zielgrößen LW und SW auf ihren Kehrwert transformiert (1/y-Transformation) und die Zielgrößen LW\_stabw und SW\_stabw auf ihren Logarithmus (log y-Transformation). Dadurch erhöht sich die Modellgüte, gekennzeichnet durch  $R^2$ ,  $R_{adj}^2$  und RMS-Error. Tabelle 5.2 zeigt die Anpassungsgüte (engl. „goodness of fit“) für das gebildete Regressionsmodell anhand der Kennzahlen. Die Bedeutungen einiger Kennzahlen sind in Tabelle 5.3 angegeben.

Tabelle 5.2: Anpassungsgüte für vorliegendes Regressionsmodell

Transformierte Zielgröße	Bedeutung	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	RMS-Error	Freiheitsgrade
Reciprocal LW	1/LW	0,995	0,983	0,005	7
Log LW_stabw	log(LW_stabw)	0,760	0,632	0,247	15
Reciprocal SW	1/SW	0,963	0,892	0,002	8
Log SW_stabw	log(SW_stabw)	0,945	0,861	0,136	9

Tabelle 5.3: Kennzahlen zur Anpassungsgüte des Regressionsmodells

Kennzahl	Symbol / Formel	Bedeutung
Zielgrößenwerte	$\hat{y}_i, \bar{y}$	Prognostizierter Wert für $y_i$ , Gesamtmittelwert der Zielgröße
Standardabweichung	$SD_y, SD_R$	Standardabweichung der Zielgröße, Standardabweichung der Residuen
Residuen	$e_i = y_i - f(x_i)$	Abstand zwischen Prognose und tatsächlichem $y$ anstelle $x_i$
Bestimmtheitsmaß	$R^2 = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{SD_y^2}$	Bestimmtheitsmaß einer Regression, Anteil der erklärten Streuung
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2)$	„fares“ Bestimmtheitsmaß bei geringer Versuchszahl; berücksichtigt Anzahl der Freiheitsgrade
RMS-Error	$RMS = SD_R = \sqrt{\frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n e_i^2}$	Mittlere Abweichung zwischen Prognose und Versuch, Standardabweichung der Reststreuung
Freiheitsgrade	df (degrees of freedom)	Anzahl der Versuche, die zur Modellierung der Reststreuung verwendet werden können

Das gebildete Regressionsmodell beschreibt also die Zielgrößen LW und SW sehr gut mit 99,5% bzw. 96,3% erklärter Reststreuung. Von den Standardabweichungen der Messwerte auf einem Musterbauteil ist allerdings nur SW\_stabw mit  $R^2=94,5\%$  gut beschrieben. Trotz einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden kann LW\_stabw nicht besser als zu einem  $R^2=76\%$  mit der vorliegenden Methode modelliert werden. Dies ist sicherlich auch auf die oben bereits beschriebenen Effekte der Messwertstreuung auf der Bauteiloberfläche zurückzuführen, die nicht von vielen einzelnen zufälligen Faktoren abhängen, sondern anscheinend von nicht erfassten Faktoren beeinflusst werden.

Nach der Variablentransformation schließt sich eine Überprüfung der Normalverteilung der Reststreuung an. In Abbildung 5.5 sind die Residuen im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt, in welchem die Normalverteilung die Gerade bildet. Eine schwache Ausreißerverteilung, mit der charakteristischen Abweichung der Werte nach unten links bzw. oben rechts, liegt nur für LW\_stabw vor. Alle anderen Residuendarstellungen zeugen von einem Modell ohne Ausreißer. Die Analyse der Residuen über die Versuchsreihenfolge ergibt keine Gesetzmäßigkeit, die auf eine Zeitabhängigkeit der Ergebnisse schließen lässt.

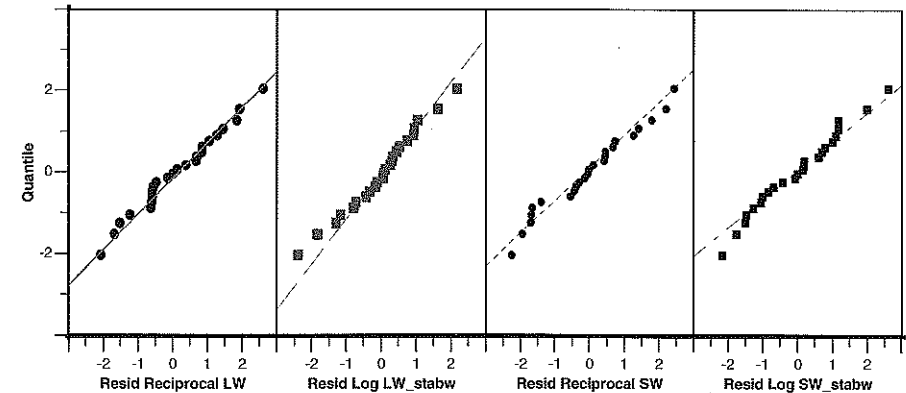


Abbildung 5.5: Reststreuung im Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung

Die oben durchgeführte Prüfung zeigt, dass das mathematische Modell das Verhalten des dargestellten RTM-Prozessmodells mit fünf Einfluss und vier Zielgrößen und der auftretenden Streuung sehr gut beschreibt. Diese hohe Aussagekraft oder Modellgüte konnte mittels der D-optimalen Versuchsplanung mit einem minimalen Versuchsaufwand von nur 24 Versuchen erreicht werden.

## 5.5 Auswertung / Analyse

Bei der Analyse historischer Daten aus ca. 200 Versuchen konnten keine Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Materialien und den Verfahrenseinstellungen nachgewiesen werden. Daher sind die im Folgenden ermittelten Ergebnisse auf alle bisher betrachteten Fasermaterialien und EP-Systeme übertragbar. Die Faserverstärkung im Bauteil verursacht durch ihre diskrete räumliche Anordnung Bereiche mit hohem und niedrigem Faservolumenanteil. Dies ist unabhängig von den Einstellungen des RTM-Verfahrens. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Matrixsystems, welche für die Amplitude des Faserabzeichnens verantwortlich ist, wird von den Matrixeigenschaften und den Verarbeitungsbedingungen beeinflusst. Neben dem Schwindungsverhalten der EP-Systeme haben die Verfahrensparameter Druck, Werkzeugtemperatur, Temperaturdifferenz, Vakuumerfüllung und Entformzeit großen Einfluss auf die Ausprägung der Oberflächenstrukturen.

Die folgenden Ergebnisse sind zunächst nur für ein EP-System ermittelt und gültig. Auch wenn für ein neues EP-Harzsystem das jeweilige Prozessfenster und die Optimierungsergebnisse anders liegen werden, so kann doch aufgrund der Ähnlichkeit der Reaktionsmechanismen auf ein ähnliches Verhalten geschlossen werden. Hier sind bei gleicher Modellgüte deutlich weniger Versuche notwendig, wenn die weggefallenen quadratischen Terme und Wechselwirkungen in der Versuchsplanung berücksichtigt werden. Bei gleicher Absicherung ist jedes Harzsystem, auch mit anderen Reaktionsmechanismen, ebenfalls durch 26 Versuche zu charakterisieren.

Zur Darstellung des mathematischen Modells für die Zielgrößen in Abhängigkeit von den Einflussgrößen bieten sich zahlreiche Möglichkeiten. In Abbildung 5.6 sind die adjustierten Response-Grafiken für die Langwelligkeit gezeigt, in Anhang I für alle Zielgrößen. In diesen wird jede Zielgröße in Zeilen gegen jede Einflussgröße in Spalten dargestellt. Die durchgeführten Versuche sind durch Punkte gekennzeichnet und zeigen so im Überblick die Verteilung der Versuche auf den Versuchsraum für jede einzelne Einflussgröße. Die Auswirkung einer Einflussgröße auf eine Zielgröße wird hier nur im Schwerpunkt der anderen Einflussgrößen dargestellt. Bei starken Wechselwirkungen, wie im vorliegenden Fall, darf dieser Darstellung nicht zu viel Vertrauen entgegengebracht werden, da über diese Kombinationseffekte hinweg gemittelt wird. Wichtig bei der Betrachtung der adjustierten Response-Grafiken ist auch, dass die transformierten Zielgrößen (also hier die reziproke Langwelligkeit) auf der y-Achse aufgetragen sind und sich die Effekte auf LW in diesem Fall nicht einfach addieren lassen.

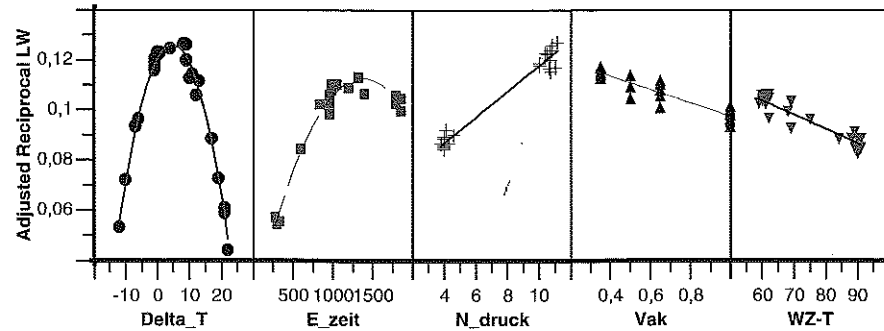


Abbildung 5.6: Adjustierte Response-Grafiken für die Langwelligkeit

In Anhang J sind die Wechselwirkungs-Grafiken (engl. „interactions graphs“) für die vier Zielgrößen angegeben. Zur Darstellung der Zweifach-Wechselwirkungen sind für jede Zielgröße alle Einflussgrößen in den Spalten dargestellt. Ihr Effekt wird bei unterschiedlichen Niveaus der anderen Faktoren durch mehrere Linien aufgezeigt. Nichtparallele Linien bedeuten eine Wechselwirkung dieser beiden Faktoren. Für die Langwelligkeit werden starke Wechselwirkungen in neun von zehn möglichen Kombinationen angezeigt. Zudem treten hier mehrfach Umkehrungen der Effekte auf, was auf nicht einfache Ergebnisflächen im Parameterraum deutet. In dreidimensionalen Darstellungen von LW als Flächen über jeweils zwei Faktoren werden also stark verdrehte und gekrümmte Flächen mit Sattelpunkten sowie lokalen Maxima und Minima in den Ecken erwartet.

Eine wesentlich bessere Darstellung bieten die Optimierungs-Grafiken (engl. „predicted response graphs“), die ebenso wie die adjustierte Response-Grafik in Zeilen und Spalten aufgebaut sind. Allerdings werden hier die prognostizierten Werte für die Zielgrößen mit Vertrauensintervall an derjenigen Stelle der Einflussgrößen dargestellt, die vom Benutzer gewählt wird. Der Arbeitspunkt kann somit für alle fünf Faktoren direkt am Bildschirm geändert und das vorhergesagte Verhalten des Systems beobachtet werden. In Abbildung 5.7 ist die

Optimierungs-Grafik für die Zielgröße LW an einem beliebig gewählten Arbeitspunkt 1 angegeben. Die Kurvenverläufe sowie die Vertrauensbereiche verändern sich aufgrund der bereits gezeigten Wechselwirkungen entscheidend, wenn ein anderer Arbeitspunkt 2 gewählt wird (siehe Abbildung 5.8). An den dargestellten Arbeitspunkten ist z.B. der LW-Wert trotz sehr unterschiedlicher Einstellungen der Faktoren fast gleich.

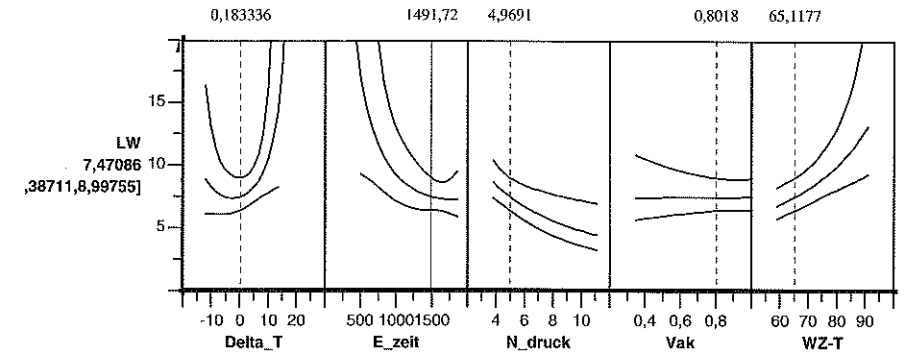


Abbildung 5.7: Predicted-Response-Grafik für LW an Arbeitspunkt 1

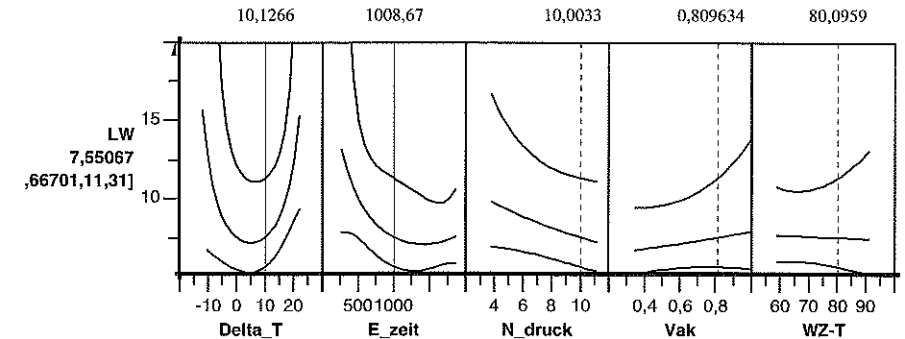


Abbildung 5.8: Predicted-Response-Grafik für LW an Arbeitspunkt 2

In Anhang K sind die Predicted-Response-Grafiken für alle Zielgrößen an beiden Arbeitspunkten zum Vergleich aufgeführt. Das mathematische Modell für den RTM-Prozess kann anhand dieser Grafiken am PC interaktiv durch Verändern einzelner und mehrerer Einflussgrößen erkundet und erfasst werden. Für den fünfdimensionalen Parameterraum und die dazugehörigen vier Zielgrößen stellt sich die Darstellung auf Papier als schwierig dar. Hier können lediglich die Effekte von jeweils zwei Einflussgrößen auf die Zielgrößen in 3D-Oberflächen- und Höhenliniendiagrammen dargestellt werden. Aus der Fülle der möglichen Darstellungen bei fünf Einfluss- und vier Zielgrößen werden im Folgenden lediglich die entscheidenden Zusammenhänge gezeigt.

Da das Modell für den RTM-Prozess zahlreiche Wechselwirkungen aufzeigt, ist die gesonderte Betrachtung für eine Einflussgröße allein nicht aussagekräftig, da sich, wie oben dargestellt, teilweise die Effekte umkehren. Daher wird z.B. bei der Betrachtung der Werkzeugtemperatur auf die Wechselwirkungen mit den anderen Einflussgrößen eingegangen.

### 5.5.1 Einfluss der Werkzeugtemperatur und der Entformzeit

Der Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Oberflächenqualität ist auch aus den historischen Daten in einzelnen Versuchsreihen ersichtlich. So zeigt Abbildung 5.9 die Langwelligkeit für Musterplatten, die bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen, aber mit den gleichen Materialien und gleichen sonstigen Prozessparametern hergestellt worden sind.

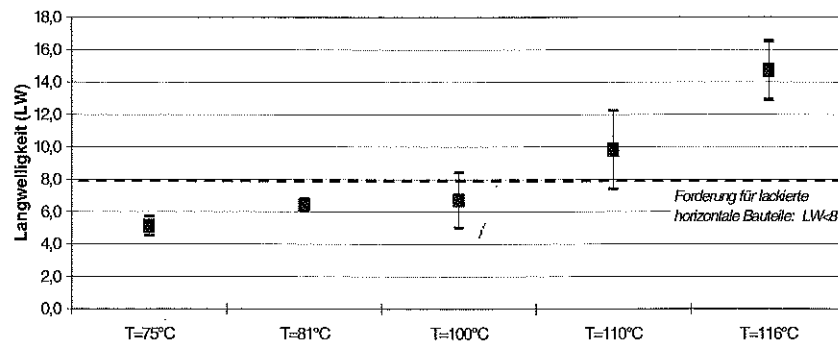


Abbildung 5.9: Direktvergleich der Langwelligkeit für verschiedene Werkzeugtemperaturen

Auch bei anderen Harzsystemen ist erkennbar, dass mit zunehmender Temperatur die Oberflächenqualität aufgrund des stärkeren Faserdurchzeichnens abnimmt. Mit zunehmender Temperatur sind chemische und thermische Schwindung größer, was zu stärkerem Durchzeichnen der Faserstruktur an der Oberfläche führt.

Der im Direktvergleich gezeigte Effekt gilt jedoch nur an einer Stelle der übrigen Prozessparameter. Wird hingegen noch die Entformzeit variiert, zeigt sich schon eine der angesprochenen Wechselwirkungen. Die vorhergesagte Langwelligkeit ist in Abbildung 5.10 in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur und der Entformzeit dargestellt. Die resultierende Fläche ist stark verdreht und besitzt Maxima bzw. Minima in den Eckpunkten. Dabei ist jedoch die Versuchsraumeinschränkung für die minimale Entformzeit zu beachten, die hier durch eine schräge Gerade mit Endpunkten angedeutet ist. Die Fläche hat eine Sattelform mit einem guten Arbeitsbereich für mittlere Temperaturen und mittlere Entformzeiten. Für eine schnelle Entformung sind jedoch hohe Prozesstemperaturen notwendig. Hier ist die Langwelligkeit für kurze Entformzeiten niedriger als für lange Aushärtezeiten. Bei niedrigen Prozesstemperaturen kehrt sich dieser Effekt um. Hier trägt eine lange Verweilzeit zu einer besseren Oberflächenqualität bei. Die optimale Abstimmung der Entformzeit auf die Werkzeugtemperatur ist als gestrichelte Linie angegeben.

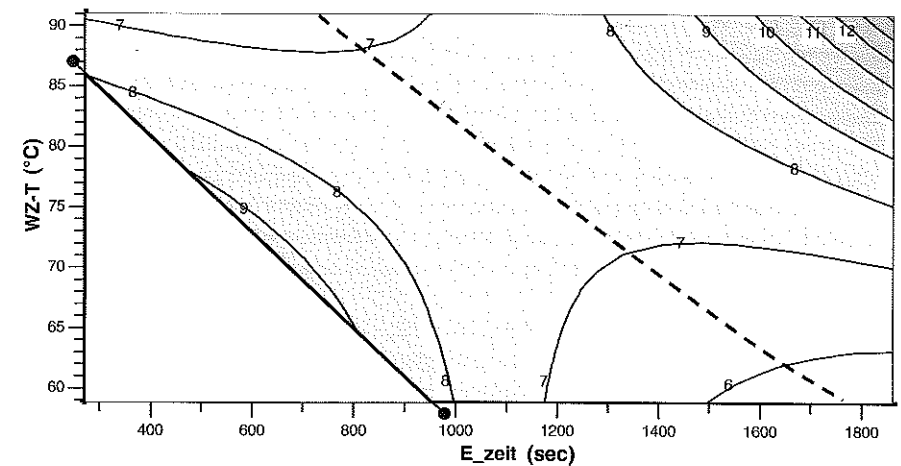


Abbildung 5.10: LW in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Entformzeit

Die Werkzeugtemperatur und die Entformzeit sind ebenfalls die zwei ausschlaggebenden Faktoren für den Aushärtegrad des Matrixsystems und der erreichten Glasübergangstemperatur  $T_g$  (siehe Abbildung 5.11).

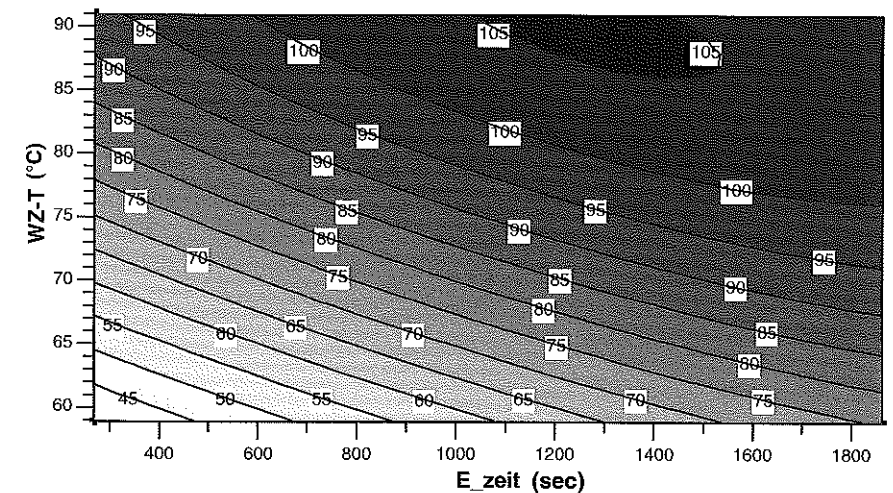


Abbildung 5.11:  $T_g$  (in °C) in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Entformzeit

Beim Vergleich beider Zielgrößen kann ein Zusammenhang zwischen einer geringen Langwelligkeit und dem erreichten  $T_g$  festgestellt werden. Anscheinend entspricht die Entformzeit für

eine hohe Oberflächenqualität derjenigen Entformzeit, bei welcher der maximal mögliche  $T_g$  für die jeweilige Werkzeugtemperatur erreicht wird. Ein früheres Entformen bei niedrigen Temperaturen oder ein längeres Verweilen im Werkzeug bei hohen Temperaturen führt offensichtlich zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität. Dabei kann der  $T_g$  auch durch sehr langes Verweilen nicht über den Sättigungs- $T_g$  hinaus ansteigen.

Die starke Wechselwirkung zwischen der Werkzeugtemperatur und der Entformzeit führt zu zwei verschiedenen Wegen zum Erreichen hoher Oberflächenqualität. Die zwei Wege haben großen Einfluss auf das Erreichen eines Mindest- $T_g$  während des Prozesses und die benötigte Prozesszeit (ausführliche Behandlung in Kapitel 5.8).

Die Zielgröße Kurzwelligkeit verhält sich für die Einflussgrößen Entformzeit und Werkzeugtemperatur ähnlich wie die Langwelligkeit. Es bestätigt sich die Annahme, dass die kurz- und langwelligen Oberflächenstrukturen beide mit zunehmendem Gesamtschumpf der Matrix ebenfalls wachsen. Die Auswirkungen von Werkzeugtemperatur auf die Standardabweichung von LW sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Auch hier kommt es durch Wechselwirkungen zu Umkehrungen der Effekte und einem Sattelpunkt.

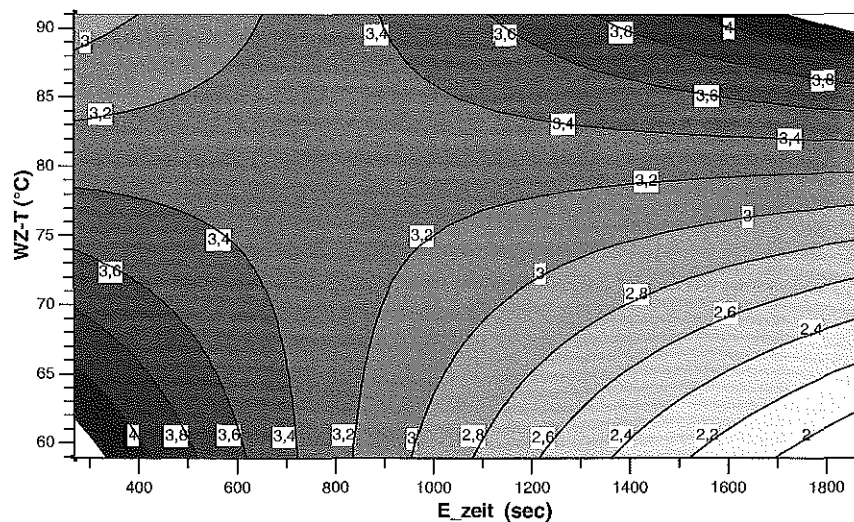


Abbildung 5.12: LW\_stabw in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Entformzeit

Für eine gleich verteilte Oberflächenqualität über der Bauteiloberfläche sollten LW\_stabw und SW\_stabw klein sein. Die langwelligen Störungen sind dann gleichmäßig verteilt, wenn auch die LW-Werte selbst niedrig sind, also bei niedrigen Werkzeugtemperaturen und hohen Entformzeiten oder im umgekehrten Fall.

### 5.5.2 Einfluss der Temperaturdifferenz

Die Temperaturdifferenz zwischen Werkzeugoberseite und -unterseite ist in der Literatur häufig als Maßnahme zur Oberflächenverbesserung zu finden. Die tatsächliche Einstellung der Temperaturdifferenz wird aber meist in Bereichen und ohne Bezug auf das eingesetzte Harzsystem angegeben. Dabei soll der folgende Effekt genutzt werden: Das Harz-Härter-Gemisch reagiert an der wärmeren Werkzeugseite schneller und geliert dort zuerst. Der Volumenschumpf kann aus der noch flüssigen Phase aus der Richtung der kälteren Werkzeugseite her stattfinden. Dieser Mechanismus ist in [32] für das RTM-Verfahren beschrieben mit der Angabe einer günstigen Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 10 \dots 15 \text{ } ^\circ\text{C}$  für EP- oder VE-Harze.

Auch in den vorliegenden Untersuchungen wurde ein Einfluss der Temperaturdifferenz auf die Oberflächenqualität ermittelt. Die systematische Betrachtung über die D-optimal geplante Versuchreihe gibt besseren Aufschluss über die Oberflächenverbesserung bei der Einführung einer Temperaturdifferenz zwischen beiden Werkzeughälften als einfache Direktvergleiche für verschiedene Harzsysteme. So zeigt der Einfluss der Temperaturdifferenz Wechselwirkungen, die für eine günstige Einstellung berücksichtigt werden müssen. So besteht ein Zusammenhang zwischen der optimalen Temperaturdifferenz und der mittleren Werkzeugtemperatur wie in Abbildung 5.13 dargestellt.

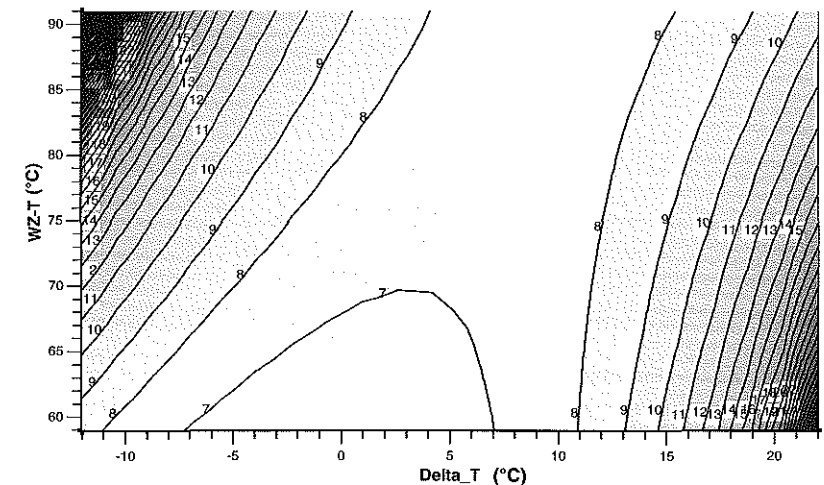


Abbildung 5.13: LW in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz und Werkzeugtemperatur

Der Kurvenverlauf der Langwelligkeit über die Temperaturdifferenz allein ist nicht monoton, sondern zeigt für verschiedene Werkzeugtemperaturen ein entsprechendes Minimum. Dieses Optimum verschiebt sich allerdings von  $0^\circ\text{C}$  für sehr niedrige WZ-T hin zu fast  $+10^\circ\text{C}$  für hohe WZ-T. Dabei bedeutet ein positives  $\Delta T$  eine höhere Temperatur auf der Sichtseite des Bauteils mit hoher Oberflächenanforderung.

Der Einfluss der Temperaturdifferenz ist abhängig vom aufgetragten Nachdruck (siehe Abbildung 5.14). Die Wechselwirkung besteht jedoch nicht so sehr in einer Verschiebung der optimalen Einstellung von  $\Delta T$ , sondern in einer Veränderung der Einflussstärke. So ist die Auswirkung der Temperaturdifferenz für niedrige Nachdrücke höher als für hohe Nachdrücke. In diesem Fall wird der Ausgleich der Schwindung der Matrix teilweise über den Nachdruck selbst erreicht und der Einfluss der Temperaturdifferenz somit vermindert.

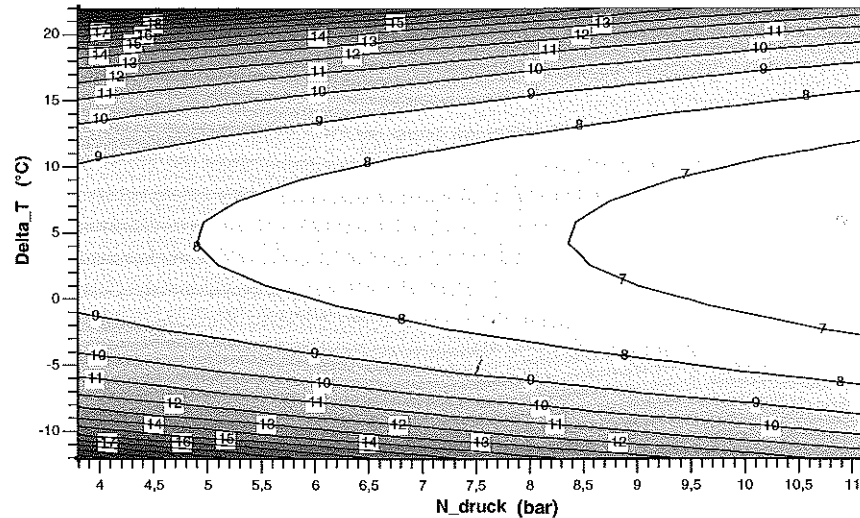


Abbildung 5.14: LW in Abhängigkeit von Nachdruck und Temperaturdifferenz

Bei Analyse der vorhergesagten Systemantwort unterscheidet sich auch hier das Verhalten der Kurzwelligkeit in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz, Werkzeugtemperatur und Nachdruck nicht wesentlich von dem der Langwelligkeit. Es liegt ein Optimum mit geringerer Auswirkung an derselben Stelle vor. Auch die Wechselwirkungen erscheinen gleich.

### 5.5.3 Einfluss des Nachdrucks

Der Einfluss des Werkzeuginnendrucks, der nach der Injektion und während der Vernetzung in der Werkzeugkavität vorliegt, ist ebenfalls in der Literatur untersucht worden. Er hat entscheidenden Einfluss auf verschiedene Bauteileigenschaften beim RTM- und S-RIM-Verfahren, wie Porigkeit, E-Modul, Bruchspannung und Bruchdehnung [68]. Die Möglichkeit, mit hohen Nachdrücken die Oberflächenqualität zu verbessern, wird in vielen industriellen Anwendungen genutzt und ist in [68] und [32] eingehender erläutert. In der Verarbeitung von Thermoplasten ist es beispielsweise üblich, nach dem volumetrischen Füllen der Kavität mit dem Dosieraggregat Nachdruck aufzubringen, um die thermische Volumenkontraktion des Materials im Formnest teilweise auszugleichen.

Nach der Injektionsphase wird der hydrostatische Druck im noch flüssigen Matrixsystem in der Kavität zusätzlich erhöht. Dies kann durch Weiterfördern geringer Harzmengen durch die Injektionseinheit, durch ein zusätzliches Nachdruckmodul oder durch Verringern der Kavitätshöhe und somit des Kavitätsvolumens durch die Schließbarkeit erfolgen. Der hohe Druck im Matrixmaterial soll den in der Vernetzungsreaktion auftretenden Schrumpf zum Teil ausgleichen. Dieser Ausgleich ist sicherlich nicht mehr in der festen Phase möglich, sondern nur bis zur Gelierphase. Zudem bewirkt ein hoher Nachdruck die Verringerung des Volumens gasförmiger Anteile im Matrixmaterial durch Lösen oder Komprimieren der Poren. Die quantitative Zunahme der Matrixkomponente ruft eine Steigerung des Vernetzungsgrades hervor, da mit Verringerung der räumlichen Trennung zwischen den funktionellen Gruppen des EP-Systems eine erhöhte Anzahl an Vernetzungsstellen zur Verfügung steht. Eine zunehmende Packungsdichte führt zu stärkeren Wechselwirkungen zwischen Molekülketten, was eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat.

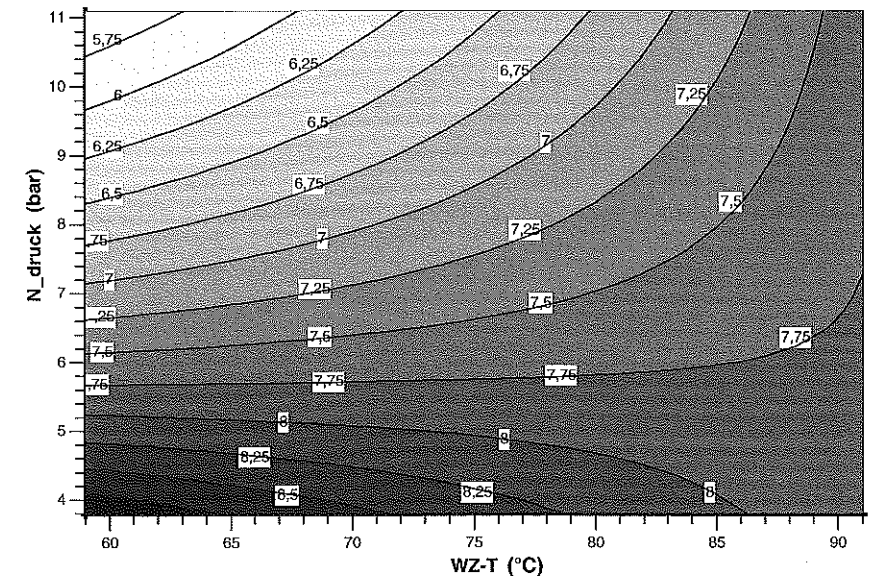


Abbildung 5.15: LW in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Nachdruck

In der vorliegenden Untersuchung wurde der Nachdruck ebenfalls als entscheidende Einflussgröße für die Oberflächenqualität identifiziert. Das oben ermittelte Prozessmodell zeigt den Einfluss für Nachdruckwerte von ca. 4 bis 11 bar. In Abbildung 5.15 ist die Verminderung der Langwelligkeit durch höhere Werkzeuginnendrücke nach der Injektion für verschiedene Werkzeugtemperaturen dargestellt. Bei niedrigen Werkzeugtemperaturen hat eine Erhöhung des Nachdrucks eine starke Verringerung der LW-Werte zur Folge. Bei höheren Temperaturen ist dieser Effekt schwächer.

Da die Erzeugung von hohen Werkzeuginnendrücken auch Schließeinheiten mit höheren Schließkräften erfordert, wurde eine gesonderte Versuchsreihe für die Auswirkungen hoher Drücke durchgeführt. Durch Verwendung einer Presse mit 800 to Schließkraft für die SMC- und GMT-Verarbeitung und durch Modifikationen am Anguss- und Entlüftungssystem konnten Drücke von über 100 bar im Werkzeug erzeugt werden.

Zur Realisierung noch höherer Werkzeuginnendrücke wurde die Parallelsteuerung der Presse selbst in Kombination mit der Injektionsanlage eingesetzt. Dafür erzeugt zunächst die Injektionsanlage nach Verschließen der Entlüftung einen Innendruck gegen eine bestimmte niedrige Pressenkraft. Sie kann somit das Werkzeug leicht „aufdrücken“ und einen Öffnungsspalt von 5-10/100 mm erzeugen. Nach Verschließen des Angusses kann die Pressenkraft gesteigert und der Öffnungsspalt geschlossen werden. Im vorliegenden Fall konnten so Drücke von weit über 100 bar erzeugt werden. Limitierend dabei war nicht die Pressenkraft von 800 to, die mit der kleinen Kavitätsfläche von 0,21 m<sup>2</sup> einen Druck von weit über 300 bar ergeben könnte, sondern die Auslegung von Dichtungen, Anguss und Entlüftung des RTM-Plattenwerkzeugs.

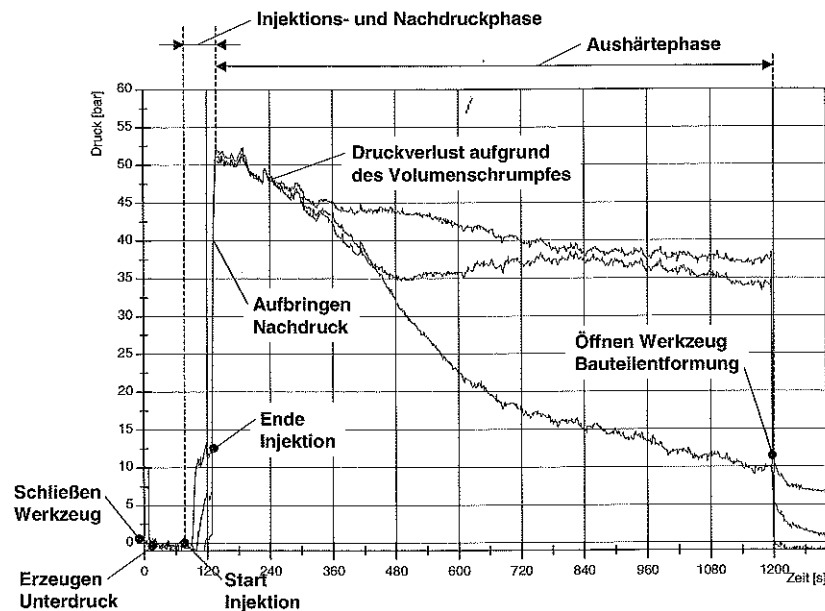


Abbildung 5.16: Typischer Druckverlauf des gesamten RTM-Zyklus für hohen Nachdruck

Ein typischer Druckverlauf für einen solchen RTM-Versuch mit hohem Nachdruck von über 50 bar ist in Abbildung 5.16 gezeigt. Die Injektionsphase in vergrößertem x-Achsen-Maßstab ist in Abbildung 5.17 zu sehen. Auch bei der Injektion wird zur schnellen Kavitätsfüllung mit hohen Drücken von über 15 bar gearbeitet. In der RTM-Technik sind sonst Injektionsdrücke von 1-7 bar typisch.

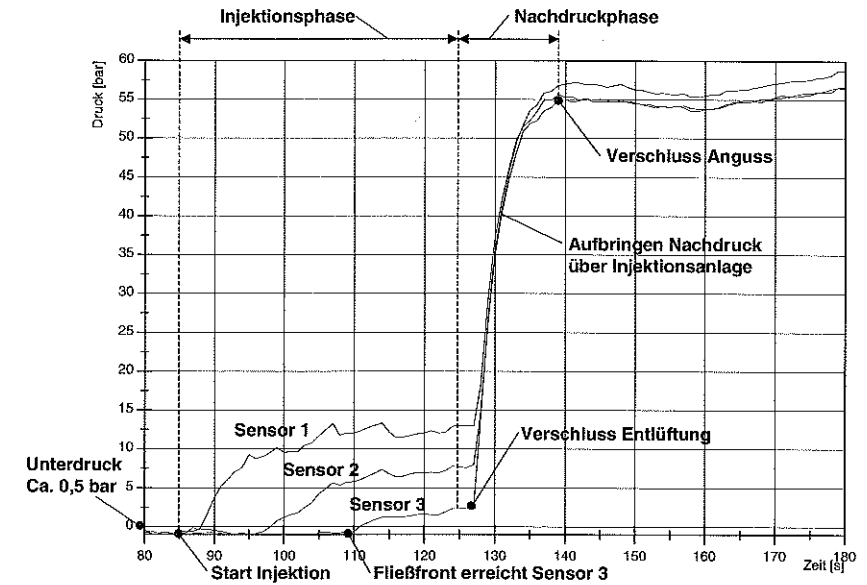


Abbildung 5.17: Typischer Druckverlauf während der Injektionsphase für hohen Nachdruck

Mit diesen zusätzlichen Versuchsergebnissen erfolgte eine Nachschärfung des bereits vorgestellten Prozessmodells. Durch die zusätzlichen Daten wurde für eine Stelle der anderen Einflussgrößen der Versuchsraum auf der Achse des Nachdrucks stark erweitert. Dies bedeutet, dass die Wechselwirkungen der anderen Einflussgrößen auf die Auswirkungen des Nachdrucks nur mit Einstellungen aus den bisherigen Daten bis 11 bar und einigen wenigen zusätzlichen Punkten ermittelt werden können. Der Einfluss des Nachdrucks selbst ist dennoch gut erfasst. Das neu gebildete Prozessmodell hat nach Variablentransformation und schrittweiser Regression die in Tabelle 5.4 gezeigte Modellgüte.

Tabelle 5.4: Anpassungsgüte für neues Regressionsmodell mit hohen ND

Zielgröße	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	RMS-Error	Freiheitsgrade
Log LW	0,923	0,890	0,149	28
Log LW_stabw	0,823	0,771	0,272	31
Reciprocal Square Root SW	0,852	0,803	0,010	30
SW_stabw	0,874	0,813	0,500	27

Die Predicted-Response-Grafik für das neue Modell ist für den bereits verwendeten Arbeitspunkt 1 in Abbildung 5.18 gezeigt. Der neu bestimmte Einfluss des Nachdrucks auf die Langwelligkeit der Oberfläche ist sehr stark. Für eine Erhöhung des Nachdrucks von ca. 10 auf 30 bar wird eine erhebliche Verbesserung der Langwelligkeit vorhergesagt. Für noch höhere Nachdrücke wird der Effekt schwächer. Der Vertrauensbereich wird aufgrund der geringen Versuchsraumabdeckung für hohe Drücke sehr breit.

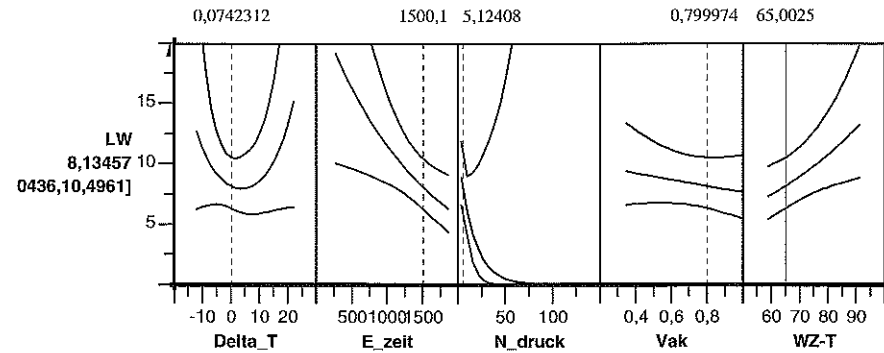


Abbildung 5.18: Neue Predicted-Response-Graphik für LW an Arbeitspunkt 1

Auch mit anderen Einstellungen der weiteren Einflussgrößen bleibt der Effekt des Nachdrucks bestehen. Nur bei Variation der Vakuumeinstellung bei der Injektion ist eine Wechselwirkung im Modell als relevant ausgewiesen (siehe Abbildung 5.19).

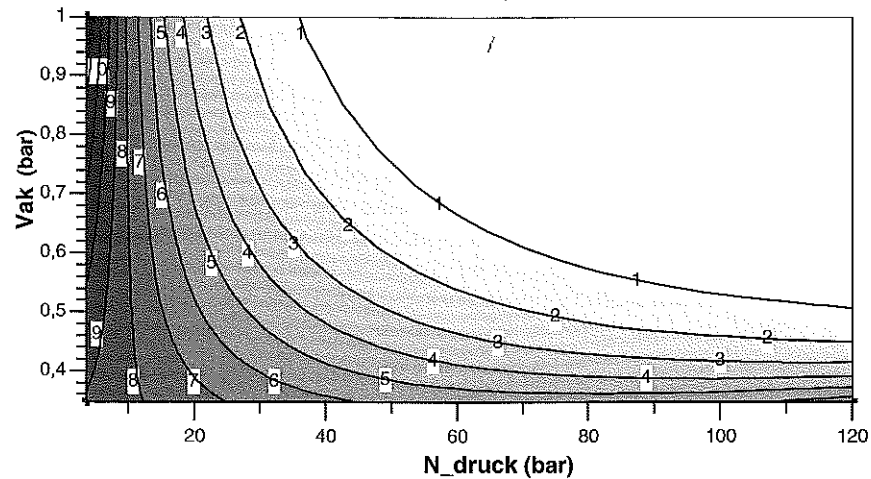


Abbildung 5.19: LW in Abhängigkeit von Nachdruck und Vakuumeinstellung für hohe Werkzeuginnendrucke

Für schwachen Unterdruck bei der Injektion, also bei Vakuumeinstellungen gegen 1, ist der Effekt des Nachdrucks auf die Langwelligkeit wesentlich stärker als bei starkem Unterdruck. Dies ist durch das Austreten gasförmiger Anteile aus dem Harzsystem und somit durch eine breitere Schaumfront bei großem Unterdruck zu erklären. Durch das Aufbringen von Nachdruck lösen sich diese Blasen zunächst wieder im Harz, was bei geringen Unterdrücken ohne Blasenbildung nicht notwendig ist. Der Nachdruck kann somit stärker zum Verringern des Schrumpfens der Matrix beitragen.

Die Auswirkungen des Nachdrucks auf die Kurzwelligkeit sind denen auf die Langwelligkeit sehr ähnlich. Eine Erhöhung des Werkzeuginnendrucks nach der Injektion führt zu geringeren SW-Werten. Die Verteilung der LW- und SW-Werte auf der Oberfläche wird ebenfalls gleichmäßiger. LW\_stabw und SW\_stabw zeigen niedrigere Werte für hohe Werkzeuginnendrucke.

#### 5.5.4 Einfluss der Vakuumführung

Zur Unterstützung des Injektionsvorgangs wird im RTM-Verfahren häufig ein Unterdruck in der Kavität mittels einer Vakuumpumpe erzeugt. Das Vacuum Assisted Resin Injection (VARI)-Verfahren oder das Vacuum Assisted RTM (VARTM) sind vakuumunterstützte Varianten des RTM. Der Unterdruck bewirkt eine größere Druckdifferenz zwischen Anguss und Fließfront zum schnelleren Tränken der Faserhalbezeuge. Durch die Reduzierung der in der Kavität befindlichen Luftmenge wird die Bildung von Luftpneumaten und Trockenstellen vermieden. So muss das Matrixsystem beim Füllen der Kavität und Tränken der Faserhalbezeuge nicht erst die Luft zwischen und in den einzelnen Faserbündeln verdrängen. Die Imprägnierung ist trotz kürzerer Injektionszeit von besserer Qualität [32].

Bei geringen Drücken nahe dem absoluten Vakuum kann es zu Ausgasungen von im Harz gelöster Luft oder flüchtigen Harz- oder Härterkomponenten kommen. Das Auftreten solcher Ausgasungen ist abhängig vom Luftgehalt des Harzsystems und dem Dampfdruck der Bestandteile bei den Verarbeitungstemperaturen. Insbesondere das in Polyester- und Vinylesterharzen enthaltene Styrol bereitet in dieser Hinsicht Probleme. Durch Entgasen der Matrixkomponenten bei Unterdruck vor der Injektion kann dieser Effekt genutzt werden, damit beim vakuumunterstützten Injizieren keine Ausgasungen mehr auftreten.

Der Zusammenhang zwischen der Langwelligkeit und den beiden Einflussgrößen Nachdruck und Vakuumeinstellung ist für moderate Nachdruckwerte in Abbildung 5.20 dargestellt. Dieses Diagramm hat aufgrund der dichteren Versuchsanordnung eine höhere Aussagekraft für diesen Nachdruckbereich als die Darstellung für hohe Nachdruckwerte. Es zeigt eine starke Wechselwirkung mit Umkehrung des Effekts. So bewirkt ein hohes Vakuum eine Verringerung der LW-Werte nur bis zu einer Nachdruckhöhe von ca. 8,5 bar. Für höhere Werkzeuginnendrucke nach der Injektion wirkt sich ein Unterdruck schwach erhöhend auf die Oberflächenwelligkeit aus.



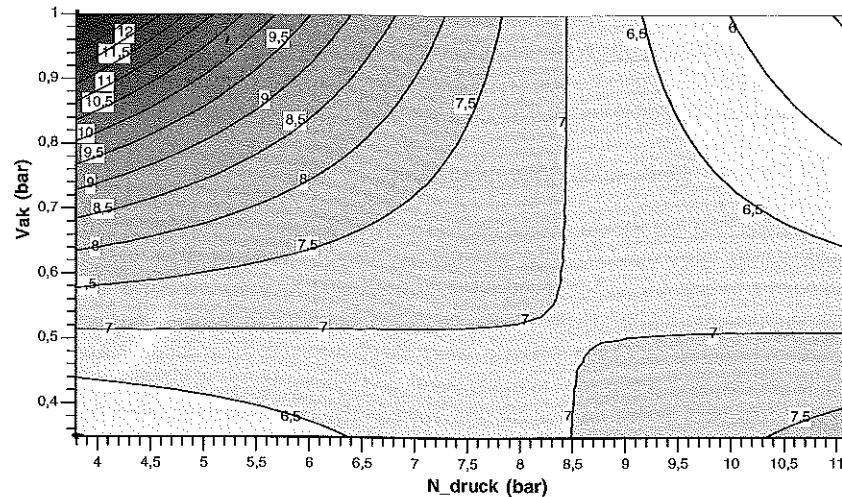


Abbildung 5.20: LW in Abhängigkeit von Nachdruck und Vakuumeinstellung

Der Einfluss der Vakuumunterstützung ist auch von/der Werkzeugtemperatur abhängig, wie in Abbildung 5.21 dargestellt ist. So ist die Verringerung der Langwelligkeit durch Erhöhen des Unterdrucks im Werkzeug erst ab einer Temperatur von ca. 63°C zu erwarten.

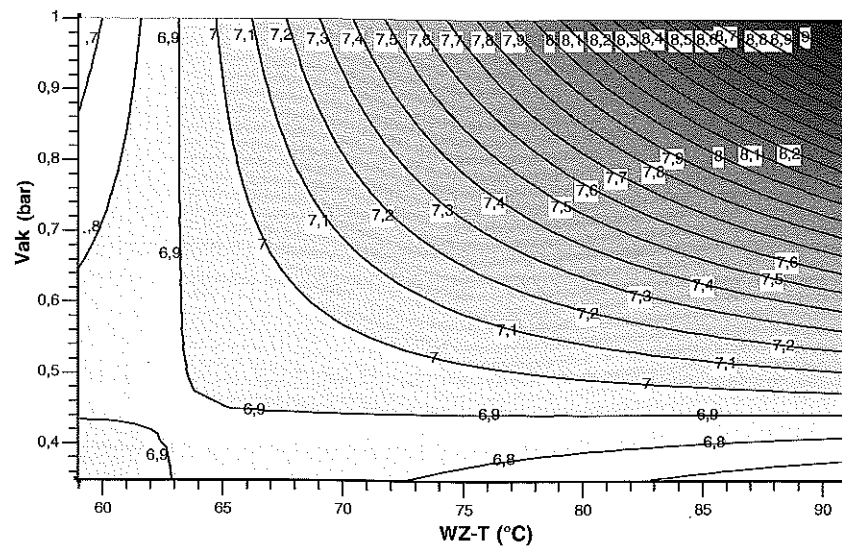


Abbildung 5.21: LW in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Vakuumeinstellung

Der Effekt verstärkt sich zunehmend mit steigender Werkzeugtemperatur. Die Ursache hierfür kann die reduzierte Injektionszeit sein, die im Prozessmodell nicht erfasst ist. Bei geringeren Verarbeitungstemperaturen ist die Gelierzeit des Matrixsystems sehr viel größer als die benötigte Injektionszeit. Bei hohen Temperaturen hingegen kann die Reaktion so schnell ablaufen, dass die Viskosität zu rasch ansteigt bevor das Bauteil gefüllt ist. Zu spät aufgebracht Nachdruck auf zum Teil geliertes Material kann sich nicht mehr wie hydrostatischer Druck flächig über das gesamte Bauteil ausbreiten. Daher kann der Effekt auf die Oberflächenqualität auch auf die Verkürzung der Injektionszeit durch Vakuumunterstützung begründet sein.

### 5.5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Analyse des gebildeten Prozessmodells mit fünf Einfluss- und vier Zielgrößen zeigte starke Haupteffekte, quadratische Effekte und zahlreiche Wechselwirkungen. Für das untersuchte Harzsystem konnten die folgenden Zusammenhänge mit einer sehr hohen Aussagekraft ermittelt werden:

Die Werkzeugtemperatur und die Entformzeit zeigen eine sehr starke Wechselwirkung mit einer Umkehrung des Effekts. So führen bei hohen Werkzeugtemperaturen sehr kurze Entformzeiten zu einer niedrigen Langwelligkeit, bei niedrigen Temperaturen dagegen lange Entformzeiten. Der Vergleich mit dem Aushärteverhalten des Harzsystems zeigt, dass die Oberflächenqualität dann am höchsten ist, wenn bei Erreichen des Sättigungs- $T_g$  für die jeweilige Werkzeugtemperatur entformt wird. Eine frühere Entformung führt zu niedrigeren Zykluszeiten auf Kosten der Oberflächenqualität. Eine spätere Entformung verringert die Oberflächenqualität, ohne eine weitere Steigerung des  $T_g$  zu bewirken.

Für die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Werkzeughälften wurde ein Einfluss ermittelt, der von den Erwartungen abweicht. Es zeigt sich ein Optimum für die Oberflächenqualität, welches sich beim Ansteigen der Werkzeugtemperatur von 60 °C auf 90 °C von ca. 0 °C hin zu 10 °C Temperaturdifferenz verschiebt. Mit steigendem Nachdruck sinkt der Einfluss der Temperaturdifferenz auf die Oberflächenqualität.

Der Nachdruck wurde zunächst für konventionelle RTM-Anlagentechnik bis ca. 11 bar betrachtet. Trotz aller Wechselwirkungen zeigt sich eine Steigerung der Oberflächenqualität durch das Aufbringen von höheren Drücken auf das noch flüssige Matrixsystem am Ende der Injektion. Um diesen Effekt stärker zu nutzen, wurden das Versuchswerkzeug und die Anlagentechnik so modifiziert, dass erstmalig im RTM-Verfahren Drücke von bis zu 100 bar erzeugt werden konnten. Das Erzeugen hoher Drücke in der Kavität direkt nach der Injektion kann einen Anteil der Volumenschwindung des Harzsystems ausgleichen und somit wirksam die Oberflächenqualität steigern.

Durch das Anlegen eines Unterdrucks an die Kavität wird die Injektionszeit verkürzt und die Qualität der Imprägnierung verbessert. Im vorliegenden Fall führte dies im konventionellen Druckbereich für das RTM-Verfahren zu einer Verminderung der Langwelligkeit. Bei großen

Unterdrücken kann es zu einem Ausgasen von gasförmigen Bestandteilen im EP-System kommen, was sich nachteilig auf die Oberflächenqualität auswirkt.

Diese vorliegenden Ergebnisse können teilweise mit den Erfahrungen aus dem Thermoplast-Spritzguss verglichen werden. Hier wird zur Kompensation der thermischen Volumenschwindung mit hohen Nachdrücken gearbeitet, was zum gleichen Effekt wie im vorliegenden RTM-Verfahren führt. Der ermittelte Einfluss des Nachdrucks ist also als Schwindungskompensation, hier für chemischen und thermischen Anteil, plausibel. Auch die geringere thermische Schwindung bei niedrigeren Verarbeitungstemperaturen ist aus dem Thermoplast-Spritzguss bekannt und aufgrund des einfachen Zusammenhangs über den Wärmeausdehnungskoeffizienten plausibel. Der Hauptunterschied, nämlich die exotherme Vernetzungsreaktion zweier Komponenten zum ausgehärteten EP-System und der hier stattfindende chemische Schwund, findet seine Auswirkung in der starken Zeitabhängigkeit und im Einfluss der Temperaturdifferenz. Der Effekt des Vakuums spiegelt den Einfluss der flüchtigen Komponenten und der Injektionszeit wider. Die ermittelten Ergebnisse umfassen also plausibel die bereits für duromere Systeme bekannten Effekte. Zusätzlich jedoch sind durch die gemeinsame Betrachtung Wechselwirkungen erkannt und im Prozessmodell beschrieben worden, die als neue Erkenntnisse zum Verständnis der Zusammenhänge beitragen.

5.6 Optimierung

Die ermittelten Effekte der fünf Einflussgrößen auf die Oberflächenqualität sind in ihren Einzelauswirkungen und ihrem Zusammenspiel komplex. Aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen und der Verdrehungen der Ergebnisflächen fällt es schwer, eine zielführende Einstellung aller fünf Faktoren mit der höchsten Oberflächenqualität zu identifizieren. Zur Suche der optimalen Einstellungen für die Einflussgrößen im fünfdimensionalen Parameterraum wurde deshalb eine rechnergestützte Optimierung mit dem Auswertungssystem Cornerstone durchgeführt. Die Optimierung erfolgt nach der Definition der Wünschbarkeitsfunktion, welche je nach Optimierungsziel auf das Erreichen von Zielwerten, auf Maximieren oder auf Minimieren, eingestellt werden kann (siehe Abbildung 5.22).

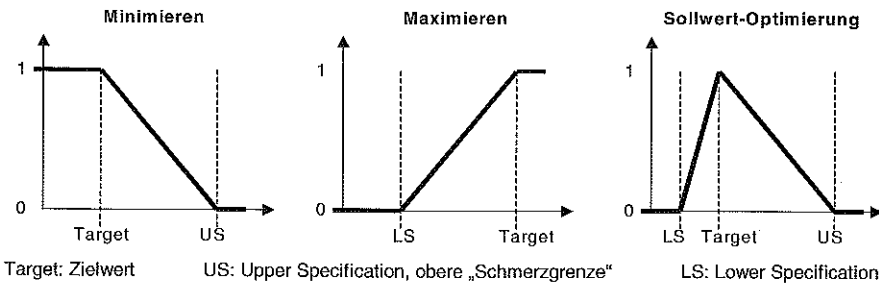


Abbildung 5.22: Wünschbarkeitsfunktionen für Minimieren, Maximieren, Sollwert-Optimierung

Die rechnergestützte Optimierung kann nach mehreren Zielgrößen gleichzeitig erfolgen, wenn die Wünschbarkeitsfunktionen der einzelnen Faktoren gewichtet und aufsummiert werden. Das Optimierungsziel wird im Erfüllungsgrad der Gesamt-Wünschbarkeitsfunktion erreicht, die in Tabelle 5.5 beschrieben ist.

Tabelle 5.5: Gesamtwünschbarkeitsfunktion zur Optimierung

Größe	Symbol, Formel
Wünschbarkeitsfunktionen (0...1)	$W_1, W_2, \dots, W_k$
Gewichtung (0...1),	$g_1, g_2, \dots, g_k$ mit $\sum_{i=1}^k g_i = 1$
Gesamt-Wünschbarkeit	$W_{ger} = \sum_{i=1}^k g_i \cdot W_i$

Die Optimierung erfolgt iterativ durch Maximierung der Gesamtwünschbarkeit nach Gradienten, d.h. sie ist abhängig vom Startpunkt. Sie liefert als Ergebnis einen Arbeitspunkt, welcher den besten Kompromiss zwischen den „Wünschen“ zu den verschiedenen Zielgrößen darstellt. Bei lokalen Maxima und Minima, wie im vorliegenden Fall mehrfach vorhanden, können unterschiedliche Optimierungsergebnisse je nach Startpunkt produziert werden.

Das RTM-Prozessmodell wird im Folgenden zunächst nach der Langwelligkeit als Kennzahl für die Oberflächenqualität optimiert. Diese Optimierung soll die Faktoreneinstellung finden, an welcher die Langwelligkeit, als Maß für den Volumenschumpf der Matrix, minimal wird. Der Zielwert für LW ist 0, die obere „Schmerzgrenze“ 20. Alle anderen Zielgrößen werden in der Wünschbarkeitsfunktion zunächst auf die Gewichtung 0 gesetzt. Die Optimierung zeigt eine starke Abhängigkeit vom Startwert und führt immer zu zwei Stellen im Versuchsraum. Die beiden Stellen sind in Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24 als Einstellungen in der Predicted-Response-Grafik für LW dargestellt.

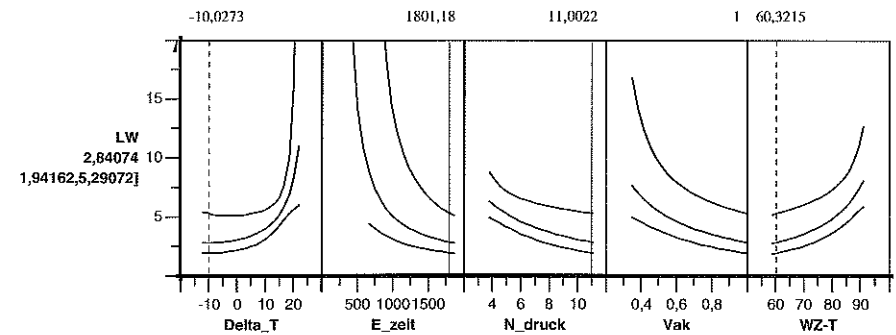


Abbildung 5.23: Optimierungsergebnis 1 für Minimierung von LW

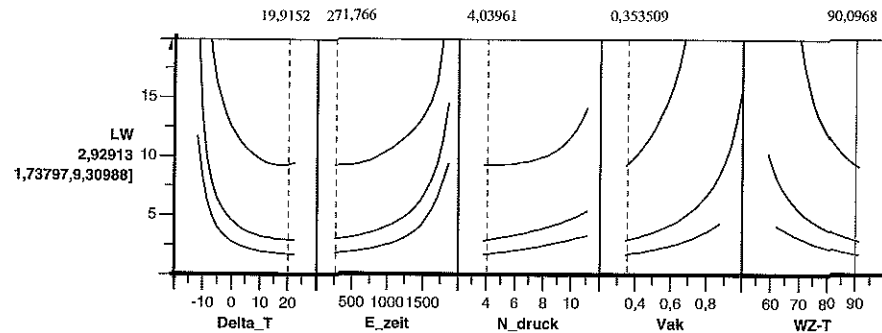


Abbildung 5.24: Optimierungsergebnis 2 für Minimierung von LW

Die beiden Einstellungen stellen jeweils gegenüberliegende Extreme in zwei Ecken des aufgespannten Parameterraums für alle Einflussfaktoren dar. Dieses Ergebnis gibt demnach zwei verschiedene Strategien zur Minimierung der Langwelligkeit vor:

- 1) Die Wahl möglichst niedriger Verarbeitungstemperaturen und langer Aushärtezeiten  
Diese Strategie ist gegenläufig zu einer kurzen Gesamtzykluszeit. Der Nachdruck auf die flüssige Phase kann hier effektiv wirken und sollte möglichst hoch sein. Das Vakuum bewirkt aufgrund der relativ langsamen Reaktion des Matrixmaterials keinen entscheidenden Zeitvorteil für die Injektion und bewirkt eher eine Verringerung der Oberflächenqualität. Die Temperaturdifferenz trägt bei einer langsamen Reaktion nicht zur Oberflächenverbesserung bei.
- 2) Die Wahl möglichst hoher Verarbeitungstemperaturen und kurzer Entformzeiten  
Diese Strategie kommt dem Ziel einer kurzen Prozesszeit entgegen. Die Injektion sollte aufgrund der schnellen Reaktion des Harzsystems durch einen starken Unterdruck unterstützt werden. So kann der hydrostatische Druck vor dem Gelieren auf der Gesamtfläche des Bauteils wirken. Die Temperaturdifferenz scheint eine Verringerung der Langwelligkeit zu begünstigen. Für höheren Nachdruck wird eine schwache Verschlechterung der LW-Werte vorhergesagt.

Die Vertrauensbereiche für solche Extremeinstellungen, insbesondere beim zweiten Optimierungsergebnis, sind aufgrund der schwierigen Versuchsbedingungen groß. Die vorhergesagten extremen Effekte für die Prozessparameter sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Auch wenn hier z.B. für höheren Nachdruck eine Erhöhung der LW-Werte vorhergesagt wird, kann aufgrund der separaten Untersuchungen zum Nachdruck von einer Steigerung der Oberflächenqualität für höhere Drücke ausgegangen werden.

Die Auswirkungen weiterer Optimierungsziele auf die Optimierungsergebnisse kann durch Einarbeiten der Zielgrößen SW, LW\_stabw und SW\_stabw in die Wünschbarkeitsfunktion erreicht werden, wie in Tabelle 5.6 aufgelistet ist.

Tabelle 5.6: Verschiedene Wünschbarkeitsfunktionen zur Optimierung

Zielgröße	Ziel	Gewichtung			
		Optimierung 1	Optimierung 2	Optimierung 3	Optimierung 4
LW	Minimieren	1	1	0	1
SW	Minimieren	0	1	0	1
LW_stabw	Minimieren	0	0	1	0,5
SW_stabw	Minimieren	0	0	1	0,5
1. Optimum		Strategie 1)			
2. Optimum		Strategie 2)			

Auch bei Minimierung der Kurzwelligkeit allein oder in Kombination mit der Langwelligkeit zeigen sich je nach Startpunkt immer wieder die beiden oben aufgeführten Strategien. Dabei ist allerdings immer die Strategie 1) günstiger im Erfüllungsgrad der Gesamtwünschbarkeit und hat engere Vertrauensbereiche.

Eine Optimierung hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Oberflächenqualität bedeutet eine Minimierung der Standardabweichungen LW\_stabw und SW\_stabw. In der Optimierung 3 zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit vom Startpunkt, was auf die zahlreichen Wechselwirkungen mit lokalen Minima zurückzuführen ist. Ebenso verläuft die Optimierung 4 nach den Welligkeitswerten selbst und gleichzeitig ihren Standardabweichungen. Die Strategien 1) und 2) führen auch hier zum höchsten Erfüllungsgrad, allerdings mit gering abweichenden Faktoreinstellungen.

Mit einer solchen Optimierung nach mehreren Zielgrößen ist auch eine weitere Betrachtung möglich. So können in die Wünschbarkeitsfunktion noch weitere Größen, wie „Prozesskosten“ oder „Energieaufwand“, einbezogen werden. Diese Größen setzen sich aus den Prozessparametern des RTM-Prozesses zusammen und berücksichtigen die entstehenden Kosten von Anlageninvest zur Erzielung hoher Drücke, Belegungszeiten durch lange Entformzeiten und Energiekosten zur Temperierung des RTM-Werkzeuges. Die Wünschbarkeitsfunktion kann so auch die Zielgröße der Wirtschaftlichkeit oder eines minimierten Energieverbrauchs beinhalten.

Mit diesen Erkenntnissen bieten sich zur Erzielung hoher Oberflächenqualität zunächst beide Strategien gleichermaßen an. Für einen serientauglichen RTM-Prozess mit möglichst kurzer Zykluszeit scheint Strategie 2) mit hohen Werkzeugtemperaturen und sehr kurzer Entformzeit die beste Lösung zu sein. Strategie 2) birgt aufgrund der extremen Einstellungen und insbesondere aufgrund der sehr kurzen Injektionszeit mehr Unsicherheiten bei der Realisierung als Strategie 1). Dies drückt sich in den breiteren Vertrauensbereichen des Prozessmodells aus. Um die Vor- und Nachteile beider Strategien besser zu verstehen, wird im Folgenden deren Auswirkung auf eine weitere wichtige Zielgröße, die im Werkzeug erreichte Glasübergangstemperatur, beleuchtet. Die Forderung nach hoher Oberflächenqualität wird zusätzlich an die Forderung nach einer minimalen Temperaturbeständigkeit des RTM-Bauteils gekoppelt.

### 5.7 Die Zielgröße Glasübergangstemperatur

#### 5.7.1 Mindestanforderungen an die Temperaturbeständigkeit

Für die Temperaturbeständigkeit besteht eine Mindestanforderung aus der Gebrauchstemperatur des Bauteils. Während unterhalb der Glasübergangstemperatur das Material im sprödelastischen Zustand vorliegt, kommt es beim Erwärmen über den  $T_g$  zu einer markanten „Erweichung“ des Materials und starken Verlusten bei Zugmodul und Schubmodul. Je vollständiger das Matrixmaterial ausgehärtet ist, desto höher sind sein  $T_g$ , die mechanischen Eigenschaften und die chemische Beständigkeit. Diese Zusammenhänge sind für die Kunststoffe allgemein in [29] beschrieben, für Epoxidharze in [31], [34], [114] und [116].

Die Anforderung an die Temperaturbeständigkeit des Matrixmaterials ergibt sich aus den erwarteten Temperaturbelastungen des Bauteils und den dazugehörigen Zeiträumen. Für eine Motorhaube setzt sich die Temperaturanforderung wie folgt zusammen:

- aus der Erwärmung durch Sonneneinstrahlung auf bis zu 100 °C über lange Zeiträume von vielen Stunden
- aus der maximalen Wärmeabgabe des Motors kurz nach hoher Motorleistung und bei minimaler Kühlung bei stehendem Fahrzeug und Abschalten des Ventilators

Diese Temperaturbelastung kann, je nach Belüftung, Geometrie und Wärmeschutzmaßnahme zwischen Motor und Frontklappe, bis zu 130°C für mehrere 10 Minuten betragen. Für die vorliegende Untersuchung sollte der  $T_g$ , der an Proben vom Bauteil mittels der DSC-Methode gemessen wird, der maximalen Gebrauchstemperatur von ca. 100°C entsprechen.

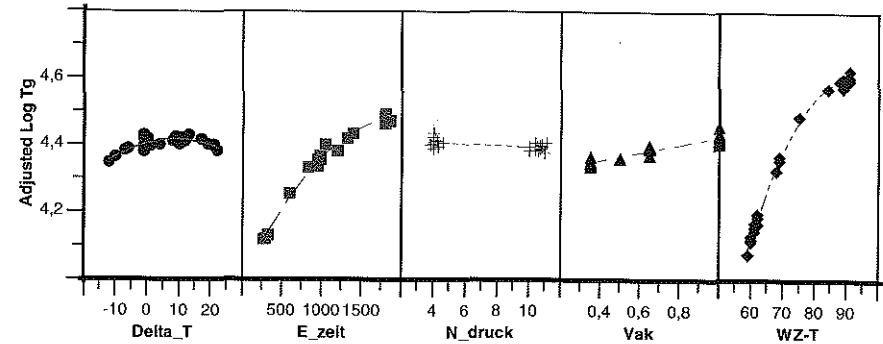
#### 5.7.2 Regressionsmodell für die Glasübergangstemperatur

Um die Zusammenhänge zwischen dem  $T_g$  des Bauteils und den bisher untersuchten fünf Prozessparametern zu erkennen, wurde nach beschriebener Methode ein vollquadratisches Modell mittels schrittweiser Regression erstellt. Es besitzt nach der Transformation der Zielgröße die in Tabelle 5.7 gezeigte hervorragende Modellgüte.

**Tabelle 5.7:** Anpassungsgüte des Regressionsmodell für  $T_g$

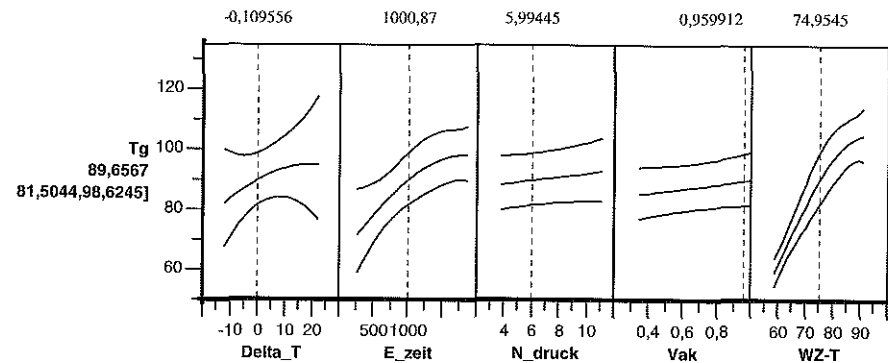
Transformierte Zielgröße	$R^2$	Adjusted $R^2$	RMS-Error	Freiheitsgrade
Log $T_g$	0,997	0,992	0,018	9

Für die fünf Einflussgrößen sind fünf Haupteffekte, drei quadratische Effekte und sechs von zehn möglichen Wechselwirkungen signifikant. Die Abhängigkeit des resultierenden  $T_g$  von den fünf untersuchten Prozessparametern im Einstellungsschwerpunkt ist in der adjustierten Response-Grafik in Abbildung 5.25 dargestellt.



**Abbildung 5.25:** Adjustierte Response-Grafik für  $T_g$  nach den fünf Prozessparametern

Die entscheidenden Einflussgrößen auf die Glasübergangstemperatur sind Werkzeugtemperatur und Entformzeit. Aber auch die Temperaturdifferenz, der Nachdruck und die Vakuumeinstellung zeigen schwache Effekte. Zur genaueren Betrachtung des gebildeten Modells dient auch hier die Optimierungs-Grafik in Abbildung 5.26. Die hier dargestellte Abhängigkeit des  $T_g$  von Werkzeugtemperatur und Entformzeit bestätigt die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.3. Die Temperaturdifferenz und der Nachdruck haben eine Wechselwirkung mit Umkehrung der Effekte. Bei geringen Temperaturdifferenzen bewirkt ein höherer Nachdruck einen ebenfalls höheren  $T_g$ . Vakuumeinstellungen mit starkem Unterdruck hingegen vermindern den  $T_g$  geringfügig. Dies ist durch die Vernetzungsdichte zu erklären, die bei höherem Druck und höherer räumlicher Dichte der Harz- und Härtermoleküle ebenfalls zunimmt.



**Abbildung 5.26:** Predicted-Response-Grafik für  $T_g$

Zusammen mit dem gezeigten Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und dem resultierenden  $T_g$  erfolgt eine neue Betrachtung der beiden Strategien zur Erreichung hoher Oberflächenqualität. Da die Strategie 1) niedrige Verarbeitungstemperaturen fordert, können hier bei beliebig langer Aushärtezeit nur begrenzte  $T_g$  erreicht werden. Diese liegen bei Verar-

beitungstemperaturen von ca. 60 °C im vorliegenden Fall bei maximal 75 °C bis 80 °C. Dies reicht allein also nicht zur Erfüllung der Temperaturanforderungen an das Bauteil. Bei höheren Werkzeugtemperaturen, wie in Strategie 2) gefordert, können hingegen nach sehr kurzen Entformzeiten von < 5 min schon  $T_g$ -Werte von über 90 °C erreicht werden. Die  $T_g$ -Anforderung von mindestens 100 °C kann bei günstigen Einstellungen der übrigen Faktoren mit Entformzeiten von ca. 10 min direkt im RTM-Werkzeug erfüllt werden.

Nach diesen Erkenntnissen scheint die Strategie 2) Vorteile hinsichtlich der kombinierten Anforderung nach hoher Oberflächenqualität, hohem  $T_g$  und kurzer Zykluszeit zu bringen. Während Strategie 1) von den Prozesseinstellungen und -zeiten leicht zu realisieren ist, stellt dagegen die Strategie 2), auch durch besondere Zusammenhänge, die im Folgenden aufgezeigt werden, ein höheres technisches Risiko dar. Durch ein weiteres Anheben des Bauteil- $T_g$ , aber auch durch eine längere Temperaturbelastung in der Größenordnung des  $T_g$ , kann sich die Oberflächenqualität des Bauteils verändern.

### 5.7.3 Nachträgliches Tempern und die Auswirkungen auf die Oberflächenqualität

Insbesondere für niedrige Verarbeitungstemperaturen und daraus resultierenden niedrigen Glasübergangstemperaturen des RTM-Teils ist ein weiterer Prozessschritt zum Anheben des  $T_g$  notwendig: Das sogenannte Tempern. Auch für hohe Verarbeitungstemperaturen kann ein solcher zusätzlicher Schritt sinnvoll sein, um kurze Entformzeiten zu erreichen. Beim Tempern wird das RTM-Bauteil in einem Temperofen nach einem festgelegten Zeit-Temperatur-Profil erhitzt und das Matrixmaterial nachvernetzt. So kann der Aushärtegrad, und mit ihm der  $T_g$  des Matrixmaterials, angehoben werden, ohne die Belegungszeit des RTM-Werkzeugs zu verlängern. Allerdings verursacht das notwendige Tempern einen weiteren zeitintensiven Prozessschritt sowie zusätzlichen Aufwand in Form von Anlagen- und Vorrichtungsinvest, Arbeits- und Energiekosten.

Zur erfolgreichen Nachvernetzung beim Prozessschritt Tempern müssen einige Besonderheiten bedacht werden. Das aus dem RTM-Werkzeug entformte Bauteil hat nach Abkühlung auf RT die geforderte Geometrie. Beim Tempersschritt wird das Bauteil in einem Temperofen so erwärmt, dass die bei der Bauteilentformung eingefrorene Vernetzungsreaktion des Bauteils fortschreitet. Diese Nachvernetzung startet erst bei Temperaturen knapp unterhalb des vorhandenen  $T_g$ . Gleichzeitig darf der aktuelle  $T_g$  des Matrixsystems nicht überschritten werden, damit keine zu starke Erweichung des Matrixmaterials stattfindet und das Bauteil seine Geometrie ändert. Zur Vermeidung dieser Geometrieänderungen werden Temperlehren eingesetzt, die das Bauteil in den Hauptmaßen und der geforderten Form halten.

Als Faustregel beim Tempern kann gelten: Das Zeit-Temperatur-Profil des Tempervorgangs muss so gewählt werden, dass der aktuelle  $T_g$  der Bauteiltemperatur um ca. 10 °C voreilt. Die Starttemperatur sollte unterhalb des im RTM-Verfahren erreichten  $T_g$  liegen. Welche Heizraten möglich sind, hängt von der Reaktivität des Harzsystems ab, also der möglichen Vernetzungs-

geschwindigkeit. Ein typisches Zeit-Temperatur-Profil ist in Abbildung 5.27 gezeigt mit einem idealerweise voreilenden  $T_g$  des Matrixsystems.

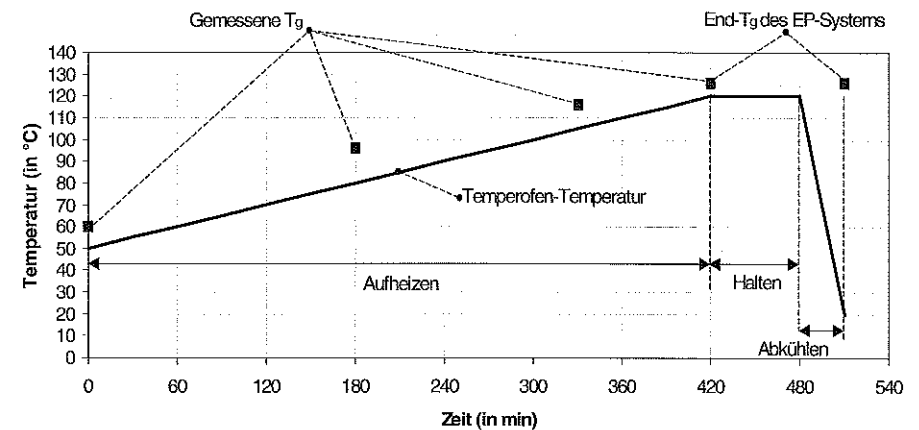


Abbildung 5.27: Typisches Zeit-Temperatur-Profil zum Nachtempern und gemessene  $T_g$

Das Bauteil kann zur Starttemperatur in den Ofen eingebracht werden. Nach der Aufheizphase folgt eine Haltephase unterhalb des geforderten  $T_g$ , in den meisten Fällen unterhalb von  $T_{g0}$  zum Stabilisieren und Abschließen der Vernetzungsreaktion. Anschließend kann das Bauteil entnommen und auf RT abgekühlt werden.

Eigene Untersuchungen zeigten, dass im vorliegenden Fall die Haltephase bei ca. 120 °C den  $T_g$  nicht mehr erhöht. Zudem war hier eine Aufheizung auf 110 °C bis 115 °C ausreichend, um den End- $T_g$  des Systems von ca. 125 °C und somit eine vollständige Aushärtung zu erreichen. Somit konnte selbst bei einer langsamen Aufheizrate von nur 10 °C/h der Zeitaufwand von 8 h auf 6 h verkürzt werden.

Bei der Nachvernetzung tritt ebenfalls eine Volumenschwindung aufgrund der Erhöhung der Vernetzungsdichte auf, was nicht nur die Bauteilgeometrie, sondern auch die Oberflächenqualität beeinflusst. Da in den Temperlehren die Bauteiloberflächen nicht vollständig vorgegeben sind, kann das Matrixmaterial hier ungehindert in Dickenrichtung schwinden. Ideal wäre ein Vernetzen des Matrixsystems im RTM-Werkzeug mit der Möglichkeit, das gesamte Bauteil in der geforderten Form zu halten und beim Tempern Druck auf die Oberflächen aufzubringen. Doch dieser Ansatz ist kontraproduktiv zu den geforderten kurzen Zykluszeiten für das RTM-Verfahren und deshalb nicht praktikabel.

Auch das Tempern soll aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in einem kurzen Zyklus durchgeführt werden, was hohe Heizraten erfordert. Für das betrachtete hochreaktive EP-Harzsystem sind prinzipiell hohe Heizraten von bis zu 60 °C/h und somit Temperzyklen von ca. 1 h möglich. Ob

eine gleichmäßige Aufheizung der Bauteile erfolgen kann oder welche Auswirkungen für die Oberflächenqualität dabei auftreten, ist jedoch ungeklärt. Deshalb wurden die Zusammenhänge zwischen dem Tempervorgang und der Oberflächenqualität erarbeitet. Zu diesem Zweck wurden vier ähnliche Musterteile mit Heizraten von 10 °C/h und 20 °C/h bei gleichen Start- und Endtemperaturen getempert. Die Musterplatten wurden in einem Gestell in der Mitte eines großen Temperofens so positioniert, dass eine gleichmäßige Aufheizung gewährleistet war. Der Ausgangs- $T_g$  für das Tempern lag bei allen Musterteilen zwischen 80 und 85 °C. Durch das Tempern wurde bei allen Musterteilen der End- $T_g$  des Matrixsystems bei ca. 125 °C erreicht. Durch Messung der Lang- und Kurzwelligkeit vor und nach dem Tempern konnte die Veränderung der Oberflächenqualität festgestellt werden. Die mit der höheren Heizrate getemperten Musterteile wiesen eine stärkere Oberflächenveränderung hin zu höheren LW-Werten auf.

Deshalb wurde der Einfluss des Temperns auf die Oberflächenqualität mit folgendem Temperprogramm untersucht:

- Starttemperatur von 50 °C
- Aufheizphase mit einer Aufheizrate von 10 °C/h bis zur Endtemperatur von 120 °C
- Haltephase von 1 h bei 120 °C
- anschließendes Abkühlen

Dazu wurden die 24 Musterteile aus den DOE-Versuchen für das RTM-Prozessmodell mit unterschiedlicher Oberflächenqualität und Aushärtegraden nach dem oben vorgeschlagenen Zeit-Temperatur-Profil nachgetempert.

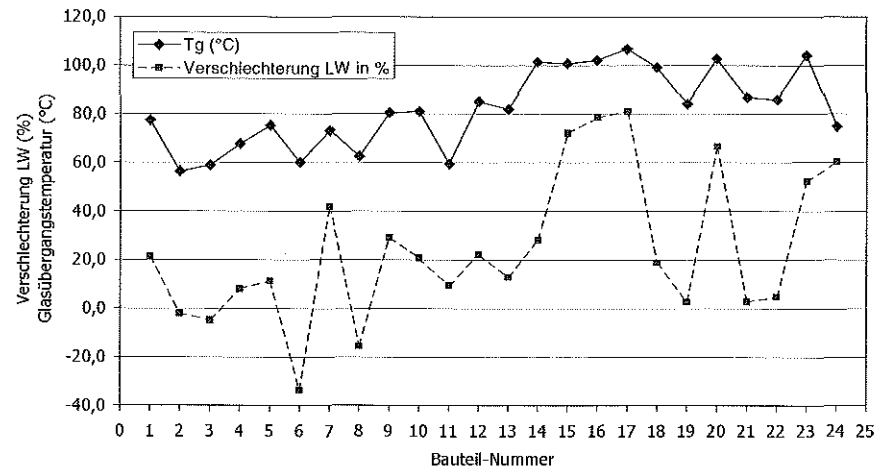


Abbildung 5.28: Oberflächenveränderung mehrerer Musterteile durch Tempern, LW-Werte

Beim Vergleich der gemessenen Lang- und Kurzwelligkeit vor und nach dem Tempern sind zumeist Verschlechterungen, in Einzelfällen auch Verbesserungen der Werte zu sehen. Scheinbar ist keine Gesetzmäßigkeit, wie eine gleiche absolute oder prozentuale Verschlechterung beim Tempern, zu erkennen. Erst bei Betrachtung der Veränderung der LW-Werte über dem Ausgangs- $T_g$  der Musterteile wird ein Zusammenhang sichtbar. Dieser ist in Abbildung 5.28 für die Langwelligkeit dargestellt. Die Kurzwelligkeit verhält sich gleichermaßen. Es ist ein Zusammenhang von  $T_g$  vor dem Tempern und der Verschlechterung der Oberflächenqualität zu erkennen. Eine Korrelation zwischen  $T_g$  und prozentualer oder absoluter Welligkeitsveränderung zum Ermitteln eines linearen Zusammenhangs zeigt jedoch eine starke Streuung, wie in Abbildung 5.29 dargestellt ist.

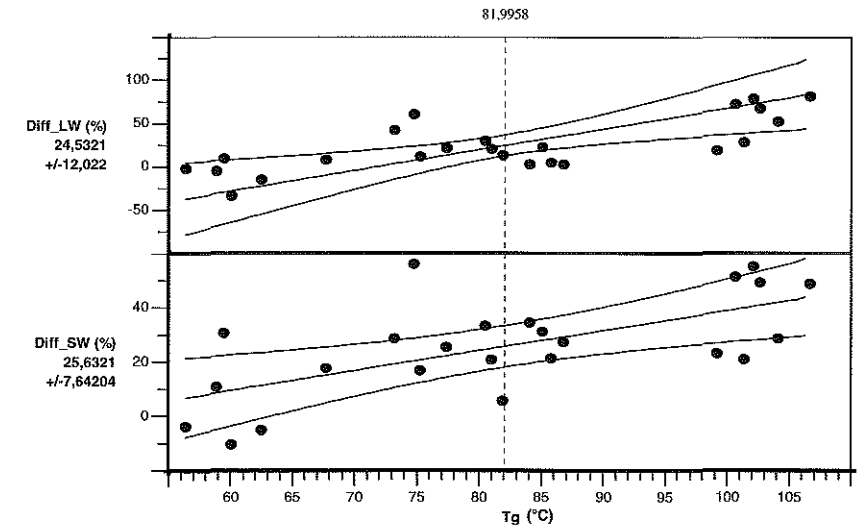


Abbildung 5.29: Zusammenhang zwischen prozentualer Veränderung der LW- und SW-Werte und ursprünglichem Bauteil- $T_g$  vor dem Tempern

Bei Bauteilen mit vorher niedrigem Vernetzungsgrad und deshalb niedrigem  $T_g$  bewirkt das oben beschriebene Tempern nur eine geringe Steigerung der LW- und SW-Werte. Eine Verschlechterung findet sich bei Bauteilen mit besonders hohem  $T_g$ , der mit hohen Werkzeugtemperaturen im RTM-Schritt erzeugt wurde. Hier liegt bereits ein Vernetzungsgrad vor, der durch das Tempern kaum noch gesteigert werden muss.

Allerdings spielt der Weg, auf welchem diese Vernetzung erzeugt wurde, eine Rolle. Bei einer sehr schnellen Vernetzung bei hohen Temperaturen kann es zum Einfrieren der Reaktion kommen, was auch als Verglasen beschrieben wird (siehe auch [114]). Dabei geht das Matrixmaterial in den glasartigen Zustand über, bevor alle Reaktanden umgesetzt sind. Die weitere Reaktion verläuft diffusionsgesteuert und ist stark verlangsamt. Beim Einfrieren der Reaktion entstehen neben einer unausgeglichenen Vernetzungsverteilung innere Spannungen zwischen

den Molekülen des Matrixsystems. Diese können anschließend im Tempervorgang beim Nachvernetzen zu Entspannungsvorgängen und Verformungen auch in Dickenrichtung führen. Dies wäre eine Erklärung für die überraschend starke Veränderung der Oberflächenqualität beim Tempern von Bauteilen mit hohen  $T_g$ .

#### 5.7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus der Forderung nach der Temperaturbeständigkeit des Bauteils ergibt sich die Zielgröße Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Mit Hilfe eines Regressionsmodells konnten die Einflüsse der Prozessparameter auf den  $T_g$  beschrieben werden. Vor allem die Aushärtetemperatur und -zeit bestimmen den  $T_g$  des RTM-Teils nach der Entformung. Kann der Bauteil- $T_g$  nach der Entformung aber nicht der Temperaturanforderung genügen, ist ein nachträglicher Temperschritt notwendig, welcher zu Oberflächenveränderungen führen kann.

Es wurde ein Temperzyklus definiert, welcher bei mittleren Ausgangs- $T_g$  zu den geringsten Veränderungen der Oberflächenqualität führt. Durch die Analyse eines umfangreichen Temperprogramms wurde ein Zusammenhang zwischen dem Ausgangs- $T_g$  der RTM-Bauteile und der Veränderung der Oberflächenqualität beim Tempern gefunden. Demnach verschlechtern sich die gemessenen Kennwerte bei Musterteilen mit niedrigem  $T_g$  signifikant weniger als bei Musterteilen mit hohem  $T_g$ . Die Veränderung der Oberflächenqualität durch nachträgliche Volumenverminderung des Harzsystems wird auf die Entspannung von inneren Spannungen zurückgeführt, die bei der schnellen Aushärtung eingefroren wurden. Dieses Verhalten der Oberflächenqualität beim Tempern ist unerwartet und stellt eine neue Erkenntnis in der Oberflächenthematik von RTM-Bauteilen dar.

Hinsichtlich der Optimierungsergebnisse für die Prozessführung bedeutet dies ein technisches Risiko für Strategie 2) mit hohen Werkzeugtemperaturen. Kann der erforderliche  $T_g$  mit dieser Strategie nicht komplett erreicht werden, verbietet sich ein Nachtempern zum Anheben der Temperaturbeständigkeit. Stattdessen muss in Strategie 2) gewährleistet werden, dass der  $T_g$  so hoch liegt, dass es durch die Temperaturbelastung bei der Lackierung und dem Betrieb nicht zu den oben beschriebenen Entspannungsvorgängen mit einer Verschlechterung der Oberflächen kommen kann. Die Langzeitauswirkungen solcher eingefrorenen Spannungen sind zudem noch ungeklärt, stellen aber ein weiteres Risiko für Strategie 2) dar.

### 5.8 Konsequenzen für den RTM-Prozess

Aus den neuen Erkenntnissen der vorangegangenen Untersuchungen leiten sich einige Konsequenzen für den RTM-Prozess zur Erhöhung der Oberflächenqualität ab. Dabei wurden die Ergebnisse zwar nur anhand eines einzelnen EP-Harzsystems ermittelt, sind aber in ihren Haupteffekten auf andere EP-Systeme mit ähnlichen Reaktionsmechanismen übertragbar. Die eingesetzten Faserhalbezeuge, bestehend aus Faserverstärkung, Textilglasmatten und Oberflächenvliesen, haben keine Auswirkungen auf diese ermittelten Einflüsse, da sie ursächlich auf andere Art zum Problem Faserdurchzeichnen beitragen. Da die ermittelten Zusammenhänge

die Verarbeitungsschwindigkeit des Matrixsystems und deren Kompensation betreffen, sind die Ergebnisse auf andere Lagenaufbauten und Faserhalbezeuge übertragbar. Allerdings müssen für die Übertragung die thermodynamischen Randbedingungen, gegeben aus Reaktivität des Matrixmaterials, Kavitätshöhe, Faservolumengehalt, Werkzeugmaterial und -temperierung, ähnlich sein.

Die Bauteilentstehung im RTM-Prozess zwischen Werkzeugschließen und -öffnen kann in drei Phasen aufgeteilt werden: Injektionsphase, Nachpressphase und Aushärtphase. In der Injektionsphase spielen im vorliegenden Prozessmodell die Werkzeugtemperatur und die Vakuumbeführung die entscheidende Rolle. Der Nachdruck wird in der Nachpressphase über die Injektionsanlage oder die Schließeinheit aufgebracht. Er wirkt auch in der Aushärtphase bis zur Bauteilentformung nach der Entformzeit. Die Aushärtung des Matrixmaterials wird entscheidend von Werkzeugtemperatur und Entformzeit beeinflusst. Die Temperaturdifferenz hat für die Verteilung der Vernetzung der Matrix über die Dicke in allen drei Phasen Einfluss auf die Oberflächenqualität.

#### 5.8.1 Die Injektionsphase

Generell ist für eine gute Oberflächenqualität auf eine schnelle Injektion zu achten, so dass vor dem massiven Anstieg der Viskosität aufgrund der Gelierung des Harzsystems noch eine Zeitspanne zur Verfügung steht. Nur so kann über die Injektionseinheit oder über die Schließeinheit ein hydrostatischer Druck gleichmäßig auf das Matrixmaterial der gesamten Bauteiloberfläche aufgebracht werden. Die Temperaturen von Harz, Härter und Werkzeug geben die Geschwindigkeit der Vernetzungsreaktion vor. Vakuum kann effektiv zur Beschleunigung des Injektionsvorgangs eingesetzt werden, was besonders bei hohen Verarbeitungstemperaturen positiven Einfluss auf die Oberflächenqualität hat. Allerdings müssen die Prozessparameter für die Injektionsphase mehreren Beschränkungen Rechnung tragen. Die Vakuumeinstellung darf nicht zum Ausgasen flüchtiger Bestandteile führen. Dies ist wiederum von der Vorgeschichte des Harzsystems und der Temperatur abhängig. Die Temperaturen von Harz, Härter und Werkzeug müssen so gewählt sein, dass die Viskosität zwar niedrig genug für eine schnelle Injektion ist, aber der starke Viskositätsanstieg aufgrund der Gelierung erst danach stattfindet.

#### 5.8.2 Die Nachpressphase

Das Aufbringen von hydrostatischem Druck auf das noch flüssige Matrixmaterial erhöht die Oberflächenqualität. Je höher der erzeugte Druck in dieser Phase ist, desto geringer werden die Lang- und Kurzwelligkeit der Oberfläche des fertigen RTM-Bauteils. Der Druck direkt nach der Injektionsphase kann auf verschiedene Arten erzeugt werden:

- 1) Die Injektionseinheit erzeugt den Nachdruck durch Weiterfordern des Matrixmaterials in die Kavität, deren Entlüftung verschlossen ist. Dabei spielt besonders der Zeitpunkt der Druckerzeugung eine große Rolle. Damit ein gleichmäßiger hydrostatischer Druck auf

der gesamten Bauteiloberfläche erzeugt werden kann, darf das Matrixmaterial, welches als erstes gemischt und zu Beginn der Injektionsphase injiziert wurde, noch nicht geliert sein. Missachtung führt zu ungleichmäßig verteilter Oberflächenqualität und in besonders ungünstigen Fällen zu lokalen Aufdickungen im Material, Schrumpfmärkungen und freiem Schrumpf. Insbesondere bei hohem Mindestausstoß der Injektionsanlage muss das Verschließen von Entlüftung und Anguss nacheinander zeitlich exakt gesteuert werden. Der Nachdruck wird von der in diesem Zeitabschnitt ins Werkzeug geförderten Übermenge Harz erzeugt.

- 2) Der Kavitätinnendruck wird durch ein ans Werkzeug angebrachtes Nachdruckmodul erzeugt, in welchem ein Kolben eine definierte Harzmenge aufnimmt und durch Zufahren wieder in die Kavität drücken kann [68]. Hier gelten die gleichen Einschränkungen wie bei der Druckerzeugung über die Injektionsanlage. Aufgrund der Ähnlichkeit zu Variante 1) wurde diese Nachdruckerzeugung in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.
- 3) Der Nachdruck wird durch Öffnen der Kavität um einen Spalt vor, während oder nach der Injektion und anschließendes Zupressen des Werkzeugs über die Schließleinheit erzeugt. Mit dieser Methode können sehr hohe Kavitätinnendrucke erreicht werden. Da der Druck flächig aufgebracht wird, erreicht er auch nach bereits einsetzender Gellierung gleichzeitig jede Stelle des Bauteils. Zudem kann durch leichtes Aufdrücken des Werkzeugs auf Übermaß der Druck im Matrixmaterial über die gesamte Aushärtephase aufrecht erhalten werden, in der Art, dass die obere Werkzeughälfte auf der Matrix in der unteren Werkzeughälfte „schwimmt“. So führt die Volumenschwindung zwar zu einer Verringerung des Werkzeugspalts, kann aber den Druck im Werkzeug nicht beeinflussen. Bei Erzeugen von Überdruck im geschlossenen Werkzeug reduziert sich dieser aufgrund der Schwindung sonst während der Vernetzungsreaktion.

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Erzeugung von Nachdruck erfordern jeweils eine unterschiedliche Anlagentechnik. Zur Erzeugung von hohen Drücken über 100 bar müssen bei Bauteilen mit einer Projektionsfläche von etwa 1 qm schon Schließkräfte von 1000 t möglich sein. Dies überfordert die konventionelle RTM-Anlagentechnik bei weitem. Mit in der Kunststoffindustrie üblichen Bauteilpressen für die SMC- oder GMT-Verarbeitung können solche hohen Drücke, je nach Bauteilgröße, realisiert werden. Drücke von über 30 bar sind zwar zur Erzeugung von hoher Oberflächenqualität sicher dienlich, erfordern aber einen höheren anlagentechnischen Aufwand als in der RTM-Industrie bisher üblich.

### 5.8.3 Die Aushärtephase

Für die Aushärtephase wurden zwei Strategien als Ergebnisse der Optimierung des RTM-Prozessmodells vorgeschlagen: Zum einen können die Bauteile bei sehr niedrigen Werkzeugtemperaturen zum Minimieren der Volumenschwindung der Matrix hergestellt werden. Dies erfordert aber die längsten Entformzeiten und ist somit gegenläufig zur Forderung nach kurzer Zykluszeit. Diese Strategie ist hinsichtlich der Prozesssicherheit unkritisch und sicher reprodu-

zierbar. Zum anderen ist die Wahl von hohen Temperaturen und kurzen Entformzeiten möglich. Bei extremen Temperaturen besteht allerdings die Gefahr, dass die Injektionszeit in der Nähe der Gellierzeit des Harzsystems liegt und die Injektion nicht ungestört verläuft. Die Aushärtephase bestimmt mit der Aushärtetemperatur und -zeit die Vernetzung des Matrixmaterials und somit den entstehenden  $T_g$ . Bei hohen Verarbeitungstemperaturen ist es möglich, im RTM-Werkzeug die Mindestanforderung an die Temperaturbeständigkeit und somit den  $T_g$  des Matrixmaterials zu erfüllen.

Sollte jedoch ein nachgeschalteter Tempersschritt zur Anhebung des  $T_g$  notwendig sein, kann sich eine schnelle Vernetzung im RTM-Prozess nachteilig auf die spätere Oberflächenqualität auswirken. Deshalb stellt Strategie 2) mit hohen Werkzeugtemperaturen und kurzen Entformzeiten ein höheres technisches Risiko für die Oberflächenqualität dar als Strategie 1) mit niedrigen Temperaturen. Andererseits bietet diese Strategie großes Potenzial zur gleichzeitigen Erfüllung der Oberflächenqualität und der Serientauglichkeit durch die kurze Zykluszeit und den Entfall des Tempersschritts.

Zur sicheren und langfristig zuverlässigeren Erzeugung hoher Oberflächenqualität wird deshalb Strategie 1) empfohlen, die zu einem Werkstoffsystem im „stabilen“, bzw. spannungsärmeren, Zustand führt. Allerdings sind hier Einbußen bei der Geschwindigkeit des RTM-Prozesses hinzunehmen, was zu geringeren möglichen Stückzahlen führt. Zudem ist bei niedrigen Werkzeugtemperaturen ein nachträglicher Tempersschritt mit weiterem Zeit- und Kostenaufwand notwendig.

### 5.9 Weitere Einflussgrößen

Neben den im RTM-Prozessmodell berücksichtigten Prozessparametern haben bisher nicht betrachtete Einflussgrößen Auswirkungen auf die Oberflächenqualität. Zu diesen zählen:

- Qualität der Werkzeugoberfläche (geschliffen, poliert, verchromt...)
- Trennmittel (Art, Applikationsmethode...)
- Temperierung von Harz und Härter vor der Injektion
- Gleichmäßigkeit der Temperierung des Werkzeugs
- Vorgeschichte der textilen Halbzeuge (Lagerung, Umformung, Feuchte, Schlichte...)
- Vorgeschichte des Matrixmaterials (Fließszenario und -längen, Lagerung, Entlüftung...)

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Auswahl günstiger Materialien und Einstellungen aus bisher gesammelten Erfahrungen. So zeigt allein die Auswahl eines günstigen Trennmittels eine große Abhängigkeit von der Qualität der Werkzeugoberfläche und der Werkzeugtemperatur. Die Variation dieser Einstellungen ist sehr kosten- und zeitintensiv, was eine systematische Betrachtung verhindert.





den RTM-Verfahren selbst auch beheizt sind, findet die Mischung hier tatsächlich beim Start der Aushärtung statt, z.B. für 90°C im Punkt B.

Die Gesamtschwindung beim Verarbeitungsprozess setzt sich aus der Reaktionsschwindung (z.B. Strecke B-D) und der thermischen Schwindung (z.B. Strecke D-L) zusammen. Während der Vernetzungsreaktion im noch flüssigen Zustand findet zwar eine Volumenverringerung statt, allerdings ohne den Aufbau von inneren Spannungen. Nach dem Gelieren, also dem Übergang in die feste Phase, bauen sich aufgrund der Schwindung auch innere Spannungen im Material auf, insbesondere bei Verstärkung mit Fasermaterialien. Nach dem Entformen des Bauteils, also nach vollständiger oder abgebrochener Aushärtung, kühlt das Matrixmaterial auf RT ab. Die dabei entstehende Volumenveränderung aufgrund des thermischen Ausdehnungsverhaltens ist abhängig von der Temperaturdifferenz und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{th}(T)$ .

Vor dem Hintergrund des Injektions- und Aushärtvorgangs lassen sich einige Aussagen für die Prozessparameter aus diesem Diagramm ablesen. Die Injektion ins geschlossene Werkzeug findet bei 90 °C im Punkt B statt. Die Vernetzungsreaktion bewirkt eine Dichtezunahme, Volumenabnahme und somit einen Druckverlust schon in der flüssigen Phase. Nach dem Überschreiten der Gellierlinie in Punkt C beginnt die Schwindung in der festen Phase, die zum Durchzeichnen der Faserstrukturen führt. Nach Entformung des Bauteils ist die chemische Schwindung abgeschlossen, und das Bauteil kühlt ab. Der Effekt des Faserdurchzeichnens wird durch die thermische Volumenverminderung des Matrixmaterials noch verstärkt. Dieses Phänomen ist an allen Musterbauteilen zu beobachten, die in heißem Zustand direkt nach der Entformung eine höhere Oberflächenqualität haben als nach dem Abkühlen wenige Minuten später.

Eine Strategie für eine möglichst geringe Gesamtschwindung laut diesem Diagramm ist eine Injektion und Gelierung des Matrixmaterials bei niedriger Temperatur. Zur Aushärtung nach der Gellierlinie muss im Idealfall die Temperatur so erhöht werden, dass die Ausdehnung aufgrund der Erwärmung oder Exothermie des Matrixmaterials immer kleiner ist als die Schwindung aufgrund der zunehmenden Vernetzung. So bleibt die Gesamtschwindung in der festen Phase minimal bei hohem  $T_g$  und Aushärtegrad. Diese Betrachtung des Diagramms nach geringster Gesamtschwindung berücksichtigt nicht die Forderung nach kurzer Zykluszeit, die durch einen solchen Prozessablauf verlängert wird.

## 6.2 Stand der Technik zur Untersuchung der Schwindung

Die lineare Schwindung oder Verarbeitungsschwindung ist nach DIN 16901 definiert als Maßunterschied zwischen Formteil und Werkzeug bezogen auf das Werkzeugmaß. Sie wird bei einer Formteil- und Werkzeugtemperatur von 23 °C bestimmt und ist eine negative Dehnung. Im vorliegenden Fall aber ist mit dem Begriff Schwindung die volumetrische Kontraktion des Matrixmaterials bei der Vernetzung und Abkühlung gemeint. Diese kann aus der linearen Schwindung nach [111] wie folgt berechnet werden:

$$S_v = 1 - (1 - S_x) \cdot (1 - S_y) \cdot (1 - S_z) \quad (6.1)$$

Verhält sich das betrachtete Material isotrop, sind die linearen Schwindungen in den drei Raumrichtungen gleich, und es kann vereinfacht werden zu:

$$S_v = 1 - (1 - S_l)^3 \quad \text{mit} \quad S_x = S_y = S_z = S_l \quad (6.2)$$

Bei Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung ergibt sich der einfache Zusammenhang zwischen linearer und volumetrischer Schwindung:

$$S_v = 3 \cdot S_l \quad (6.3)$$

Zur Ermittlung der Volumenänderung des Matrixmaterials bei der Verarbeitung und Abkühlung auf RT gibt es zahlreiche Untersuchungen. So hat Schmidt in [111] die Verarbeitungsschwindung von Thermoplasten im Spritzguss analysiert und modelliert. Dyckhoff stellt in [32] eine Messmethode zur Ermittlung der linearen Schwindung bei der Verarbeitung von duromeren Harzsystemen vor. In der verwendeten Schwindungsmesszelle wird die Längenänderung eines mit Harz gefüllten Silikon Schlauches erfasst. Fischbach nutzt in [37] zur Bestimmung der Volumenänderung von duromeren Spritzmassen ein temperiertes Dilatometer, in welchem BMC-Material unter verschiedenen Druckbedingungen isochor oder isotherm aushärten kann. Die Volumenänderung in der flüssigen Phase ist problemlos durch Kompression in einer Richtung zu erfassen. Die Volumenänderung nach der Gelierung am festen BMC zu messen, gestaltet sich schwieriger. Wacker untersucht den Volumenschwund von Epoxidharzsystemen in [119] mittels einfacher Pyknometer aus Messing mit ca. 10 ml Inhalt und einem Glasdeckel mit Kapillare. Die Oberfläche des EP-Harztes ist mit Silikonöl abgedeckt, welches die skalierte Kapillare emporsteigen kann. Da das Harzsystem nach der Gelierung an der Messingwandung haftet, bauen sich dort Randspannungen auf und das Harzsystem schwindet in den Raumrichtungen unterschiedlich.

Eine anspruchsvolle Messmethode stellen Booß und Hauschildt in [14] mit einem Quecksilberdilatometer vor. Das Dilatometer besteht aus einem temperierten Kupferzylinder mit einer flachen, scheibenförmigen Ausdehnung. Die Ausdehnung ist zur halben Höhe mit Quecksilber gefüllt und durch eine Bohrung von unten mit einer Glaskapillare verbunden. Das Harzsystem wird von oben auf das Quecksilber in die Ausdehnung gegeben und diese dann mit einem Deckel dicht verschlossen. Eine feine Messkapillare zeigt die Volumenänderung von Quecksilber und Harz beim Aufheizen, Reagieren und Abkühlen an. Die Anordnung ist aufgrund der Scheiben-Geometrie mit einem großen Durchmesser und kleiner Dicke günstig für exotherm reagierende Harzsysteme. Aufgrund der Gesundheitsgefährdung ist die Handhabung von offenem Quecksilber im Labor sehr kritisch zu bewerten. Eine ähnliche, scheibenförmige Anordnung der Harzprobe in einem Dilatometer benutzen Kinkelaar, Muzumdar und Lee in [66]. Hier ist das Harzsystem in flachen Beuteln aus Lebensmittelfolie eingeschweißt, um es vom umgebenden Silikonöl zu trennen.

Eine ausführliche Behandlung des Schwindungsverhaltens von ungesättigten Polyestern erfolgt durch Roth in [105]. Die hier vorgestellte Wegaufnehmer-Messzelle besteht aus einem würfelförmigen Gefäß aus Weich-PVC, um Randspannungen zu vermeiden. Die Volumenänderung

des Matrixsystems im Gefäß wird anhand der Bewegung eingetauchter Fühler mit hochempfindlichen DMS- bzw. Induktivaufnehmern als Längenänderung in zwei Richtungen gemessen. Motahhari and Cameron nutzen in [89] ebenfalls die Längenänderung zur Schwindungsmessung an Epoxidharzsystemen. Das Harzsystem befindet sich in einer oben offenen Rinne aus Aluminium, in welcher die Positionsänderung von eingetauchten Drahtzeigern die Längenänderung anzeigt. Das Anhaften des Matrixsystems an der Rinne soll durch die Verwendung von Trennmittel und Wachsfolie vermieden werden, um eine spannungsfreie Volumenänderung in Längsrichtung zu erhalten. Einen interessanten Ansatz über den Bimetall-Effekt zeigen Lange, Toll, Manson und Hult in [75]. Das zu untersuchende EP-Harz oder Acrylatharz wird als dünner Film auf einen sehr dünnen Blechstreifen aus Aluminium aufgebracht, welcher sich bei der Aushärtung und Volumenkontraktion des Matrixmaterials durchbiegt. Weitere Ergebnisse zu Schwindungsmessungen an duromeren Harzsystemen finden sich außer in den oben aufgeführten Quellen noch bei Hill, Muzumdar und Lee in [51], bei Korotkov, Chekanov und Rozenberg in [69] und bei Yang und Lee in [126].

Das Hauptproblem bei den meisten Schwindungsmesszellen ist die notwendige, große Menge an Harz, die bei reaktiven Harzsystemen zu einer nicht kontrollierbaren Temperatursteigerung führen kann. Die flüssigen Komponenten müssen eine klare Trennfläche zum Trägermedium haben. Zur Volumenerfassung müssen sie aber ständig, auch nach dem Gellieren, in Kontakt mit diesem stehen. Weiterhin muss das reaktive Harzgemisch aus Gründen der Wiederverwendung leicht von der Messzelle getrennt werden können. Es darf bei der Messung von Volumenveränderung keine Behinderung des Schrumpfes in einer Richtung vorliegen. Deshalb muss ein Anhaften des gelierten Matrixmaterials an den Gefäßwänden durch Trennmittel, besser Trennflächen oder fehlenden Kontakt, unterbunden werden.

Neben solchen aufwendigen Messungen besteht die Möglichkeit, an den flüssigen Komponenten und an dem reagierten Material Dichtemessungen durchzuführen. Dies gibt jedoch keinen Aufschluss über die Anteile der Volumenänderung oder die Aushärtungsgeschichte des Materials. Die benötigten Messmethoden sind für Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen in DIN 16 945 [24] und DIN 16 946 [25], für Kunststoffe und Elastomere in DIN 53 479 [28], für Mineralöle und verwandte Stoffe in DIN 51 757 [26] und für Anstrichstoffe aus Epoxidharzen in DIN 53 188 [27] beschrieben. Die Bestimmung der volumetrischen Gesamtschwindung für Polyester- und Epoxidharze ist im International Standard ISO 3521 [55] festgelegt. Auch hier wird mittels Volumenbestimmung die Dichte der Einzelkomponenten vor der Reaktion und die Dichte des vernetzten Produkts ermittelt. Eine weitere Methode besteht darin, das Harzsystem in Formen definierter Größe reagieren zu lassen und anschließend die Probenmaße zu bestimmen. Diese Methoden sind aber bei reaktiven Harzsystemen immer ungenau, da zur Vermeidung von Exothermie das Gesamtvolumen sehr gering und daher die Versuchskörper sehr klein sein müssen.

### 6.3 Schwindungsmessungen an Epoxidharzsystemen

Zum Überwinden der oben genannten Schwierigkeiten bei der Schwindungsbestimmung wurde eine neue Messzelle entwickelt und aufgebaut. Sie soll den Verlauf des Volumens über die gesamte Reaktion der Einzelkomponenten bis zum ausgehärteten und abgekühlten Kunststoff aufzeigen und so die einzelnen Schwindungsanteile erkennbar machen. Die hier vorgestellte neue Methode zur Schwindungsbestimmung ermöglicht so Erkenntnisse und Aussagen über hochreaktive Matrixsysteme, die vorher nicht möglich waren.

Die Messzelle ist in Abbildung 6.2 schematisch dargestellt. Sie besteht aus einem Glasbehälter mit Glasdeckel, in welchem Glasstäbe und dünne Folienröhrchen mit dem zu untersuchenden EP-Harz eingebracht sind. Die Röhrchen sind aus temperaturbeständiger PEI-Folie und PEI-Klebeband hergestellt und unten verschlossen. Der Glasdeckel ist mittels eines Schliffs mit dem Behälter dicht verbunden und trägt eine lange Mikrobürette mit einer feinen Volumenskala. Eine Zuleitung mit einem Absperrventil aus Teflon seitlich am Behälter führt zu einem Reservoir mit Silikonöl oberhalb der Messzelle. Thermoelemente messen innerhalb des Behälters die Temperaturen im Öl und in mehreren EP-Harz-Röhrchen. Die Messzelle ist bis über den Glasdeckel zur Temperierung in ein Ölheizbad eingetaucht.

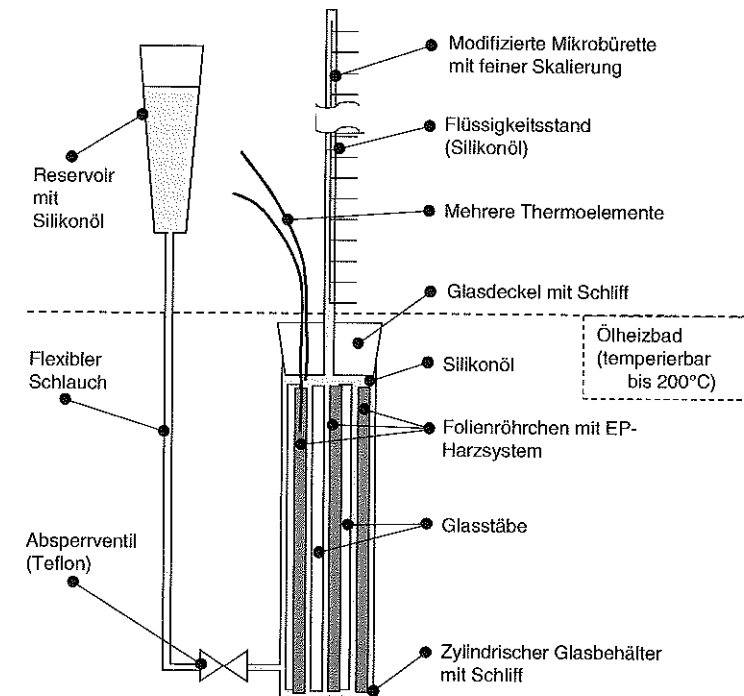


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Schwindungsmesszelle

Harz und Härter werden bei RT im stöchiometrischen Verhältnis gemischt und mit einer Spritze luftblasenfrei in die Folienröhrchen injiziert. Diese Folienröhrchen werden zusammen mit den Glasstäben in den Glasbehälter gestellt. Für eine hohe Messgenauigkeit soll das eingesetzte Ölvolumen gering und das Epoxidharzvolumen groß sein. Das Verhältnis von zu untersuchender Volumenveränderung  $V_{EP,EP}(T)$  zu gemessener Volumenänderung  $V_{voll}(T)$  (siehe Gleichung 6.4) kann durch den Einsatz von Glasstäben, die das Ölvolumen verringern, verbessert werden.

Nach Platzierung der Thermolemente im Glasbehälter wird dieser mit dem Glasdeckel über den Schliff verschlossen. Aus dem Reservoir kann die Messzelle blasenfrei mit Silikonöl so befüllt werden, dass ein definierter Flüssigkeitsstand in der Mikrobürette erreicht wird. Diese vorbereitenden Schritte müssen aufgrund der sofort einsetzenden Vernetzungsreaktion sehr schnell durchgeführt werden. Die Messung startet jetzt mit Erfassen der Startzeit, der Starttemperatur und des Startvolumens. Zum Aufheizen auf die gewünschte Verarbeitungstemperatur wird der gesamte Glasbehälter mit Glasdeckel in ein präzise beheizbares Ölbad eingetaucht.

Vom Startpunkt an werden die Temperaturen über die Thermolemente und das Volumen über den Füllstand der Mikrobürette zu definierten Zeitpunkten erfasst. Nach der gewünschten Aushärtezeit für das Matrixsystem wird die Messzelle aus dem Ölheizbad entnommen und mit Wasser abgekühlt. Die Volumen- und Temperaturänderung wird bis zum Erreichen von RT aufgezeichnet. Nach der Messung kann das Silikonöl wieder ins Reservoir abgelassen, die Messzelle geöffnet und die Folienröhrchen mit ausgehärtetem EP-Harz entnommen werden. Vor und nach jeder Messung wird das Gewicht des Epoxidharzsystems bestimmt. In Abbildung 6.3 ist der Verlauf von angezeigtem Volumen und gemessenen Temperaturen über der Zeit für eine Schwindungsmessung gezeigt. Der Temperaturanstieg im Harz aufgrund der Exothermie kurz nach dem Aufheizen im Ölbad ist deutlich erkennbar.

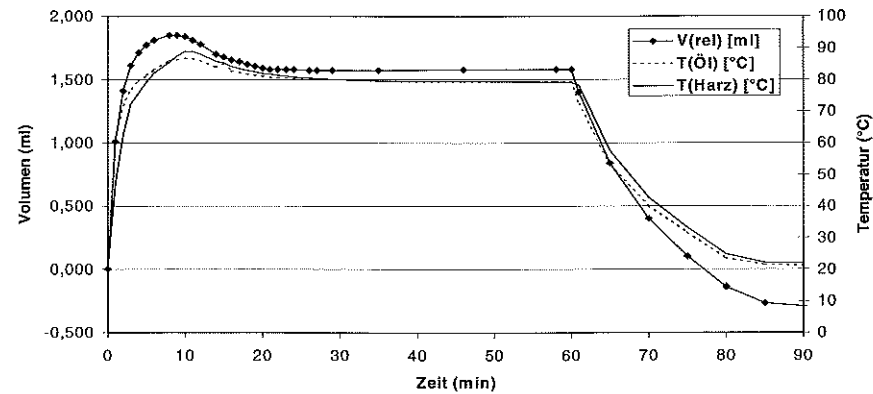


Abbildung 6.3: Typischer Verlauf von Volumen und Temperatur über der Zeit für Schwindungsmessung an einem EP-System

Neben der oben beschriebenen Vollmessung, in der sich mit EP-Harz gefüllte Folienröhrchen im Glasbehälter befinden, werden Leermessungen durchgeführt. Diese finden mit der gleichen Apparatur, der gleichen Anzahl von Glasstäben und dem gleichen Füllstand in der Mikrobürette statt, um die Volumenänderung der Messzelle und des enthaltenen Silikonöls bei Aufheizung und Abkühlung zu erfassen. Da bei der Leermessung auch das Volumen des Öls mitgemessen wird, welches in der Vollmessung durch EP-Harz ersetzt wird, muss die Leermessung um die Volumenänderung dieses Übervolumens korrigiert werden. Dabei sind alle Volumina als Differenzvolumen zum Anfangsvolumen bei der Starttemperatur RT angegeben.

Die gesamte Volumenänderung von EP-Harz, Öl und Messzelle ab der Starttemperatur ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$V_{voll}(T) = V_{EP,EP}(T) + \{V_{leer}(T) - V_{EP,\text{Öl}}(T)\} \quad (6.4)$$

mit

$V_{voll}(T)$	=	Bei der Vollmessung gemessenes Gesamtvolumen
$V_{EP,EP}(T)$	=	Volumenänderung des EP-Harzsystems in der Messzelle
$V_{leer}(T)$	=	Bei der Leermessung gemessene Volumenänderung
$V_{EP,\text{Öl}}(T)$	=	Korrekturvolumen; Volumenänderung des Öls mit dem Startvolumen des EP-Harzes

Das Korrekturvolumen berücksichtigt die Ausdehnung des Öls, welches in der Vollmessung durch EP-Harz ersetzt wird. Es wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$V_{EP,\text{Öl}} = \frac{m_{EP}}{\rho_{EP,RT}} \cdot \alpha_{\text{Öl}} \cdot (T_{\text{Öl}} - T_{RT}) \quad (6.5)$$

mit

$m_{EP}$	=	Masse des EP-Harzes in der Messzelle
$\rho_{EP,RT}$	=	Dichte des EP-Harzes bei RT
$\alpha_{\text{Öl}}$	=	Wärmeausdehnungskoeffizient des Silikonöls
$T_{\text{Öl}}$	=	Temperatur des Silikonöls während der Messung
$T_{RT}$	=	Raumtemperatur

Durch Abziehen der korrigierten Leermessung von der Vollmessung an gleichen Temperaturen kann also der Anteil der Volumenänderung des EP-Harzsystems ermittelt werden. Der Volumenverlauf für das EP-Harz über der Temperatur ergibt sich demnach zu:

$$V_{EP,EP}(T) = V_{voll}(T) - \{V_{leer}(T) - V_{EP,\text{Öl}}(T)\} \quad (6.6)$$

Die prozentuale Volumenänderung des EP-Harzsystems ergibt sich aus der berechneten Volumenänderung und dem Startvolumen der Einzelkomponenten:

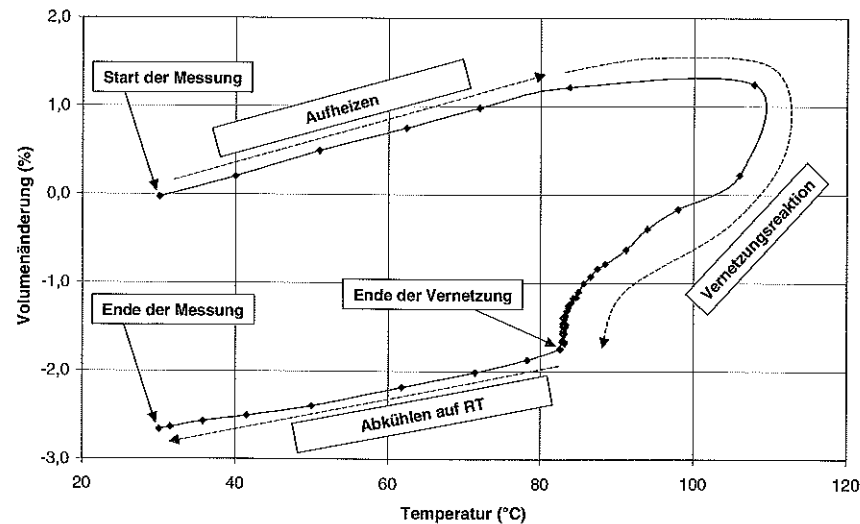
$$V_{EP} \% (T) = \frac{V_{EP,EP}(T)}{(m_{EP} / \rho_{EP,RT})} \cdot 100\% \quad (6.7)$$

Zum Ermitteln der Volumenänderung des EP-Harzsystems nach oben beschriebener Methode ist die Kenntnis der in Tabelle 6.1 angegebenen Größen notwendig.

**Tabelle 6.1:** Zur Berechnung der Volumenschwindung des Matrixsystems notwendige Materialkennwerte und Messgrößen

Größe	Symbol	Quelle	Wert
Masse des eingesetzten EP-Harzsystems in der Messzelle	$m_{EP}$	gewogen vor Messung für jedes Experiment	7,00 .. 9,00 g
Dichte des eingesetzten EP-Systems bei RT	$\rho_{EP,RT}$	gemessen für Harze und Härter, Mischdichten berechnet	1,112..1,140 g/cm <sup>3</sup>
Wärmeausdehnungskoeffizient des Silikonöls	$\alpha_{Öl}$	Herstellerangaben nach Datenblatt	0,00101 1/K
Temperaturen des Silikonöls bei Voll- und Leermessung	$T_{Öl}$	gemessen mit Thermoelementen im Silikonöl	RT..200,0°C
Temperaturen des EP-Harzes bei Voll- und Leermessung	$T_{EP}$	gemessen mit Thermoelementen im EP-Harz	RT..200,0°C
Gesamte Volumenänderung bei Leermessung	$V_{leer}(T)$	gemessen an Flüssigkeitsstand in Mikrobürette	0 .. 3,00 ml
Gesamte Volumenänderung bei Vollmessung	$V_{voll}(T)$	gemessen an Flüssigkeitsstand in Mikrobürette	0 .. 3,00 ml

Das Differenzvolumen aus Gleichung 6.6 beschreibt die Volumenänderung des EP-Harzes in den Folienröhrchen in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur. Es zeigt das Aufheizen auf Verarbeitungstemperatur, die Volumenschwindung aufgrund der Vernetzungsreaktion und die Abkühlung des EP-Harzes auf RT. Ein typischer Verlauf des Volumens über der Temperatur ist in Abbildung 6.4 für das Harzsystem B2 gezeigt. Die einzelnen Punkte stellen die Zeitpunkte dar, an welchen das Volumen und die Temperaturen erfasst werden. Sie haben in diesem Beispiel einen Abstand von einer halben Minute. So ist die Aushärtung zeitlich nachvollziehbar, in diesem Fall 30 Minuten von Erreichen der Aushärtetemperatur bei 80 °C bis zum Start der Abkühlung auf RT.



**Abbildung 6.4:** Dichte-Temperatur-Diagramm für Harzsystem B2 für die Schwindungsmessung mit 80°C und 30 min

Um die Aussagekraft dieser neuen Methode zur Schwindungsmessung zu prüfen, wurde eine Fehlerbetrachtung für das Ergebnis der Volumenänderung des EP-Harzes  $V_{EP} \%(T)$  durchgeführt. Dabei wurden die in Tabelle 6.1 angegebenen Eingangsgrößen um die realistisch anzunehmenden Abweichungen aus Messfehler (Gerätegenauigkeit, Ablesefehler) so variiert, dass sich insgesamt die ungünstigsten Auswirkungen auf die Ergebnisgröße ergeben. Diese Auswirkungen auf das Ergebnis sind im Vergleich zu einer idealen 100%-Messung ohne Fehlerabweichungen in Tabelle 6.2 angegeben. Dabei wird auch die Sensitivität der Methode gegenüber der einzelnen Eingangsgrößen aufgezeigt.

**Tabelle 6.2:** Fehlerbetrachtung für vorgestellte Methode zur Schwindungsbestimmung

Eingangsgröße	Absoluter Fehler	Prozentualer Fehler	Prozentuale Auswirkung auf Ergebnisgröße
$m_{EP}$	$\pm 0,01$ g	$\pm 0,11$ %	$\mp 0,04$ %
$\rho_{EP,RT}$	$\pm 0,002$ g/cm <sup>3</sup>	$\pm 0,18$ %	$\mp 0,07$ %
$\alpha_{Öl}$	$\pm 0,00001$ 1/K	$\pm 0,99$ %	$\pm 0,61$ %
$T_{Öl,leer}$	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,20$ %	$\pm 0,23$ %
$T_{Öl,voll}$	$\pm 1$ °C	$\pm 1,00$ %	$\mp 1,99$ %
$V_{leer}(T)$	$\pm 0,01$ ml	$\pm 0,6$ %	$\mp 0,65$ %
$V_{voll}(T)$	$\pm 0,01$ ml	$\pm 0,4$ %	$\pm 0,99$ %
Alle Fehler gleichzeitig (In ungünstigster Konstellation)			$\pm 4,58$ %

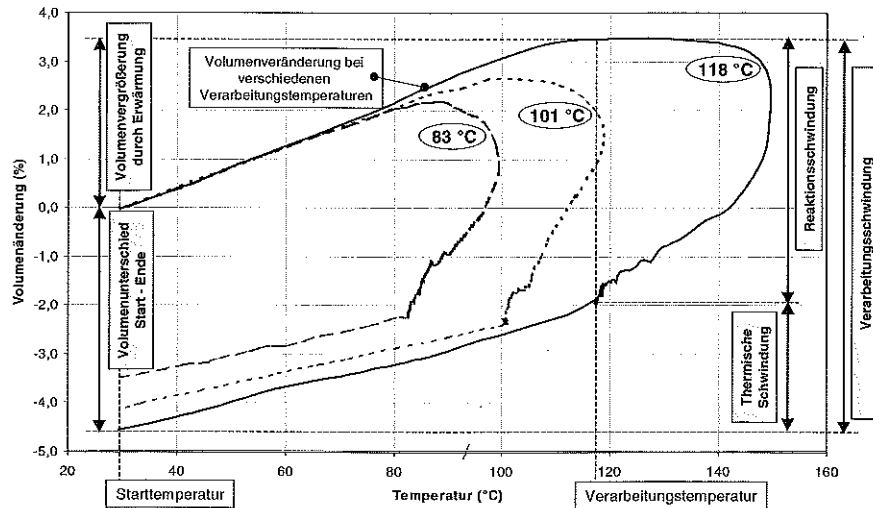
Insbesondere die präzise Erfassung der Temperatur und des Volumens ist für die Güte der Messungen entscheidend. So ergibt sich bei einer Abweichung der Temperaturmessung von 1 °C eine Veränderung der gemessenen Schwindung an dieser Stelle von 2,0 %. Ein Fehler in der Volumenbestimmung von 0,01 ml ergibt eine Ergebnisabweichung von 1,0 %. Daher wurde bei der Versuchsdurchführung auf präzise Erfassung der Temperaturen geachtet und für die Volumenerfassung eine besonders lange und dünne Mikrobürette mit einer Skaleneinteilung und Toleranz von 0,01 ml eingesetzt.

#### 6.4 Ergebnisse der Schwindungsmessungen

Zur Charakterisierung der Harzsysteme wurden nach der oben beschriebenen Methode Messungen bei verschiedenen Aushärtetemperaturen und -zeiten durchgeführt, um die Abhängigkeit der Volumenschwindung vom Harztyp, der Verarbeitungstemperatur und der Aushärtezeit zu bestimmen. Ziel der Untersuchung ist auch, für ein Harzsystem den Verarbeitungsprozess so zu gestalten, dass die Volumenschwindung des Matrixsystems möglichst gering und so die am Bauteil auftretende Oberflächenstruktur minimiert wird.

In Abbildung 6.5 sind die Ergebnisse einiger Schwindungsmessungen im Dichte-Temperatur-Diagramm beispielhaft für das Harzsystem A1 bei verschiedenen Aushärtetemperaturen gezeigt. Der Verlauf der Volumenänderung gibt Aufschluss über die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der gemischten Einzelkomponenten und die Schwindungsanteile, die beispielhaft

für die Schwindungsmessung bei 118 °C gekennzeichnet sind. Diese beiden Anteile aus Reaktionsschwindung und thermischer Schwindung sind mit der vorgestellten Messmethode gut voneinander zu trennen und auszuwerten und in Anhang L für alle Messungen aufgeführt.

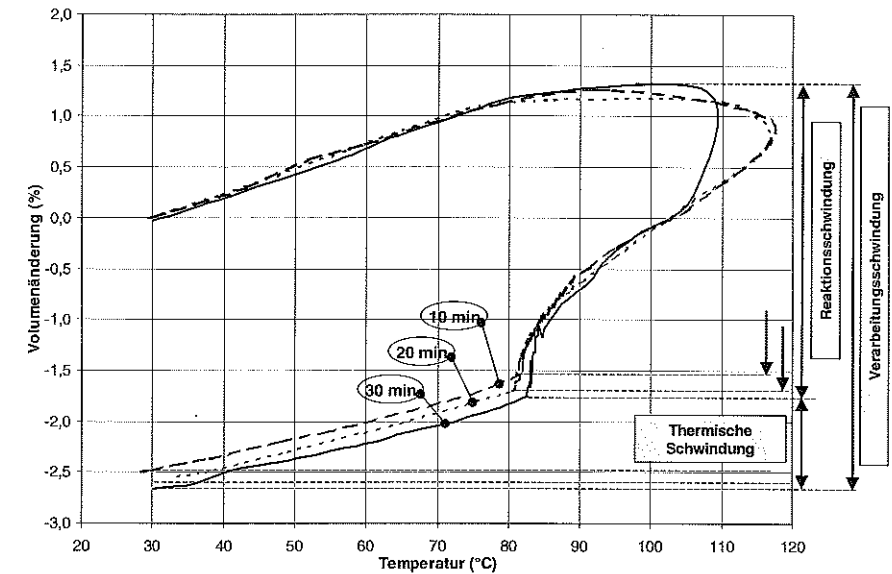


**Abbildung 6.5:** Dichte-Temperatur-Diagramm für das Harzsystem A1 bei unterschiedlichen Temperaturen

Für die Abzeichnung von Faserstrukturen sind die Anteile zwischen den beiden folgenden Zeitpunkten maßgebend:

- Ende der Injektion und Start der Vernetzungsreaktion im geschlossenen Werkzeug bei Verarbeitungstemperatur (siehe Punkt B oder Punkt H in Abbildung 6.1)
- Erreichen der Raumtemperatur nach Entnahme und Abkühlung des fertigen Bauteils (siehe Punkt F in Abbildung 6.1)

Der Einfluss unterschiedlicher Aushärtezeiten bei gleicher Verarbeitungstemperatur ist in Abbildung 6.6 am System B2 beispielhaft gezeigt. Die Verarbeitungsschwindung und ihre Aufteilung auf die beiden Anteile verändern sich je nach verwendetem Harzsystem, nach Verarbeitungstemperatur und Aushärtezeit.



**Abbildung 6.6:** Dichte-Temperatur-Diagramm für das Harzsystem B2 bei 80°C und unterschiedlichen Aushärtezeiten

Bei den hier betrachteten, hochreaktiven EP-Systemen findet der größte Anteil der Reaktionsschwindung innerhalb sehr kurzer Zeit statt. Dies wird bei Betrachtung des Kurvenverlaufs und der Dichte der Messpunkte in Abbildung 6.4 deutlich, die in gleichen zeitlichen Abständen von 30 sec liegen. Diese Erkenntnis kann verfahrenstechnisch so genutzt werden, dass eine Schwindungskompensation durch Nachdruck frühzeitig einsetzen muss. Wird der Nachdruck nicht vor dem Gelpunkt aufgebracht, ist der größte Anteil der chemischen Volumenschwindung nicht mehr auszugleichen.

### 6.5 Modellbildung und -analyse

Mit Hilfe eines statistischen Auswertesystems wurde aus den Ergebnissen der Schwindungsmessungen ein Regressionsmodell mit den drei Einfluss- und vier Zielgrößen aus Tabelle 6.3 gebildet. So konnte das gemessene Schwindungsverhalten der fünf Harzsysteme bei verschiedenen Aushärtezeiten und -temperaturen in ein mathematisches Modell überführt werden. Als Eingangsdaten und Stützpunkte für dieses Regressionsmodell dienen die in Anhang L aufgelisteten Ergebnisse der Schwindungsmessungen.

Tabelle 6.3: Einfluss und Zielgrößen für Schwindungsmodell

Einflussgrößen (Einheit)	Abkürzung	Zielgrößen (Einheit)	Abkürzung
EP-Harzsystem (--)	Harzsystem	thermische Ausdehnung beim Aufheizen (%)	Aufheizen
Temperaturdifferenz WZ_T - RT (°C)	Delta_T	chemische Volumenschwindung bei der Reaktion (%)	Chemisch
Aushärtezeit (min)	Zeit	thermische Volumenschwindung beim Abkühlen (%)	Abkühlen
		Verarbeitungsschwindung gesamt, (chemisch + thermisch) (%)	Gesamt

Durch Variablentransformation und schrittweise Regression wurde das mathematische Modell bis zu einer sehr hohen Modellgüte angepasst, was sich in den hervorragenden Kennzahlen in Tabelle 6.4 widerspiegelt. Das Schwindungsverhalten konnte also sehr gut modelliert und die auftretende Streuung der Ergebnisse gut durch das Modell erklärt werden. Da die auftretenden Abweichungen vom vorhergesagten Schwindungsverhalten normalverteilt sind, werden keine weiteren, hier unberücksichtigten Einflüsse erwartet.

Tabelle 6.4: Anpassungsgüte für vorliegendes Regressionsmodell für die Volumenschwindung der EP-Harzsysteme

Transformierte Zielgröße	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	RMS-Error	Freiheitsgrade
Aufheizen	0,9982	0,9963	0,0569	10
Reciprocal Chemisch	0,9858	0,9798	0,0083	14
Log Abkühlen	0,9937	0,9895	0,0635	12
Log Gesamt	0,9968	0,9929	0,0230	9

Eine Betrachtung der Reststreuung im Wahrscheinlichkeitsnetz zeigte für dieses Modell keine Ausreißerverteilung, die auf besondere Fehler bei einzelnen Versuchen schließen lässt. Die Abhängigkeit der Schwindungsanteile von Aushärtezeit und -temperatur kann für fünf verschiedene Harzsysteme mit einem D-optimalen Versuchsplan mit nur 23 Versuchen statistisch sinnvoll erfasst werden. Unter Berücksichtigung der nicht signifikanten Terme entsteht für die Zielgrößen eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden, wie in Tabelle 6.4 gezeigt ist.

Die Charakterisierung eines EP-Systems allein kann nach dieser Methode vollfaktoriell mit neun Versuchen erreicht werden. Unter Berücksichtigung der bereits gewonnenen Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung ist eine erste Charakterisierung des Schwindungsverhaltens eines neuen EP-Systems mit nur drei weiteren Versuchen möglich. Die neu ermittelten Daten werden dann in die bereits bestehenden Versuchsergebnisse eingefügt und das Schwindungsmodell erneut mittels schrittweiser Regression gebildet.

Die adjustierten Response-Grafiken sind für das gesamte Modell in Anhang M dargestellt. Hier ist das Modell für alle drei Einflussgrößen und die transformierten Zielgrößen im Schwerpunkt des Parameterraums als Matrix dargestellt. Weiterhin ist die Lage der ermittelten Daten aus den Schwindungsmessungen im gebildeten Modell gekennzeichnet. Zur eingehenden Betrachtung bietet sich die Predicted-Response-Grafik an, die in Abbildung 6.7 an einer Einstellung der

Einflussgrößen dargestellt ist (für System B2, Delta\_T=70°C, Zeit=30min). So können für die gewählte Aushärtezeit (Delta\_T + RT ≈ 100°C), und -zeit die Schwindungsanteile für die einzelnen Harzsysteme verglichen werden. Gleichzeitig ist der Einfluss der Temperatur und der Aushärtezeit auf die einzelnen Anteile der Schwindung für das System B2 dargestellt. Da hier die Zielgrößen direkt aufgetragen sind, ist eine Addition der Effekte auf die beiden Schwindungsanteile „Chemisch“ und „Abkühlen“ zum Effekt auf „Gesamt“ richtig. Neben der vorhergesagten Systemantwort sind auch hier die Vertrauensbereiche für 95% Aussagewahrscheinlichkeit angegeben.

Im dargestellten Beispiel wird für das Harzsystem B2 bei einer Temperaturdifferenz von 70 °C und einer Aushärtezeit von 30 min eine gesamte Verarbeitungsschwindung von 4,31 % vorhergesagt. Sie setzt sich aus den beiden Anteilen der chemischen Schwindung mit 3,14 % und der thermischen Schwindung beim Abkühlen mit 1,18 % zusammen.

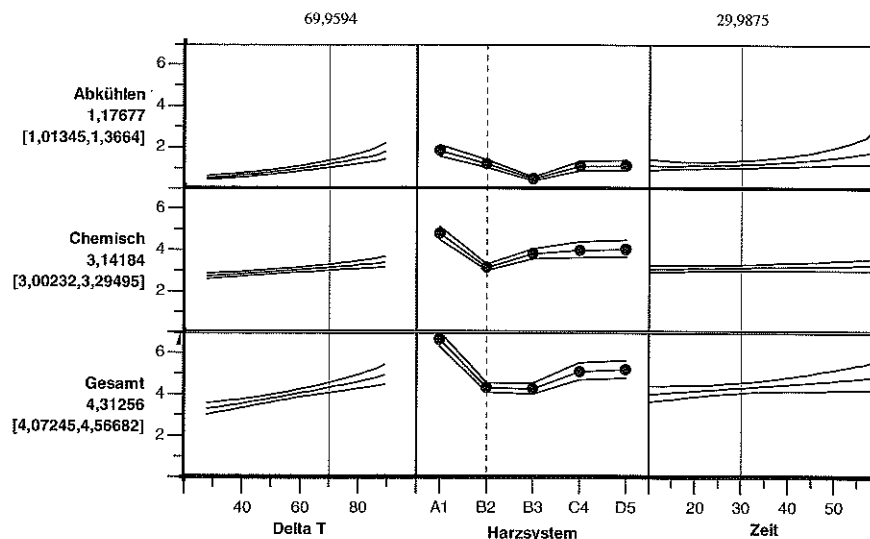


Abbildung 6.7: Predicted-Response-Grafik für das Schwindungsverhalten von verschiedenen EP-Systemen (Darstellung für 30min, System B2, 70°C)

Bei der interaktiven Auswertung des Regressionsmodells für die Verarbeitungsschwindung anhand der Predicted-Response-Grafik zeigten sich folgende Effekte für alle Harzsysteme:

- 1) Die Reaktionsschwindung steigt mit zunehmender Aushärtezeit. Im Dichte-Temperatur-Diagramm streben die beiden Geraden für die gemischten Komponenten und das ausgehärtete Material bei steigender Temperatur leicht auseinander.
- 2) Wie erwartet nimmt die thermische Schwindung bei höheren Verarbeitungstemperaturen zu. Das ausgehärtete Material kontrahiert beim Abkühlen auf RT gemäß seines Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Temperaturdifferenz.

- 3) Die Aushärtezeit hat einen geringen Einfluss auf die Schwindung. Mit zunehmendem Vernetzungsgrad steigt die Volumenschwindung schwach an.

Diese qualitativen Ergebnisse aus der Schwindungsuntersuchung decken sich mit dem aus der Literatur bereits bekannten Schwindungsverhalten von einzelnen EP-Systemen und Duromeren im Allgemeinen. Dies bestätigt die Plausibilität der Messmethode und Auswertung der Messergebnisse. So stimmen die hier gemessenen Schwindungsverläufe und ermittelten Effekte 1 bis 3 mit dem Dichte-Temperatur-Diagramm von Domininghaus [29] für EP-Systeme quantitativ überein. Die in der Literatur vorliegenden Schwindungsverläufe für die Aushärtungsreaktion von EP-Systemen bei Wacker [119], Dyckhoff [32] und Motahhari [89] bestätigen ebenfalls quantitativ die vorliegenden Ergebnisse.

Wacker bestimmt für drei langsam reagierende EP-Systeme die Schwindungsverläufe mit Messing-Pyknometern. Durch die Reaktion bei 80°C und ein anschließendes Nachtempern bei 100°C sind die Effekte vermischt. Zudem treten bei Wiederholungsversuchungen Abweichungen von bis zu 65 % auf, was an der Genauigkeit zweifeln lässt. Für das armingehärtete EP-Harz gibt er eine chemische Volumenschwindung in der festen Phase von 1,27 % und eine thermische Schwindung von 3,5 % für die Abkühlung von 100 °C auf RT an. Diese Werte liegen durchaus im Bereich der hier ermittelten Ergebnisse für hochreaktive EP-Systeme.

Dyckhoff zeigt für ein reaktives EP-System (DER 330 / DEH 39 von Dow Chemicals) den mit der Schlauchmesszelle ermittelten Schwindungsverlauf für die Aushärtung bei 60 °C und 80 °C. Durch die starke Exothermie werden unkontrolliert Aushärtetemperaturen > 200 °C über nicht definierte Zeiträume erzeugt. Die resultierende chemische Volumenschwindung beträgt 9,3 % für 80 °C Ofentemperatur und 4,5 % für 60 °C Ofentemperatur.

Die Messungen von Motahhari über die Längenänderung von EP-Harz in einer Aluminiumrinne führen zu Werten für die chemische Volumenschwindung von 3,75 % und die thermische Schwindung von 2,85 % für eine Aushärtetemperatur. Da die Harztemperatur nicht erfasst wurde, ist keine Aussage über die Exothermie oder den Dichte-Temperatur-Verlauf möglich.

Bei den meisten anderen Quellen sind aufgrund der schwierigen Messung anstatt der Schwindungsverläufe nur absolute Werte für die einzelnen Schwindungsanteile oder die Gesamtschwindung angegeben. Diese geben allerdings weitere Anhaltspunkte für die qualitativen Aussagen des hier ermittelten Schwindungsmodells. So kommt Lange [75] für ein dicht und ein weniger dicht vernetztes EP-System über Dickenmessungen auf lineare Reaktionsschwindungen von 2,9 % und 1,7 % bei einer Verarbeitungstemperatur von 100°C. Daraus folgen über Gleichung 6.3 Werte für die chemische Volumenschwindung von 8,7 % und 5,1 %, was sehr hoch erscheint. Pigott ermittelt über die Längenänderung von EP-Harz (BPA-Harz mit aminischem Härter) in Glaskapillaren eine volumetrische Reaktionsschwindung von 2,6 % ohne Angabe der Aushärtetemperatur. Zum Vergleich dieser und der hier gewonnenen Werte für EP-Harzsysteme bieten sich zudem vorliegende Messungen an anderen Matrixsystemen an. Bei Yang werden beispielsweise für ein UP-Harz (UP551 von Cook Composites) und ein VE-Harz

(VE350 von Dow Chemicals) Reaktionsschwindungen von 7,6 % und 8,1 % bei einer Aushärtetemperatur von 35°C angegeben. Durch den Zusatz von Low-Profile-Additiven kann die chemische Schwindung von UP-Harzen reduziert werden, wie Liu in [79] anhand einer Schwindungsverminderung von ca. 10% auf <3 % für verschiedene Temperaturen demonstriert.

Korotkov macht in [69] ohne die Angabe von Versuchsergebnissen die Aussage, dass für EP-Harzsysteme die maximale chemische Schwindung bis zu 5 % beträgt und davon mindestens 60 % in der flüssigen Phase stattfinden. Die vorliegenden Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu dieser Aussage, können sie aber auch nicht ausreichend nachweisen.

Im Vergleich zu den in der Literatur vorgestellten Methoden zur Schwindungsmessung bietet die hier beschriebene Methode große Vorteile hinsichtlich folgender Merkmale:

- Hohe Messgenauigkeit (siehe Fehlerrechnung)
- Erfassung der Volumenänderung, nicht gemischter Effekte (kein Anhaften an Gefäßwandung oder Umweg über lineare Schwindung)
- Erfassung der Harztemperatur zur Erstellung des Dichte-Temperatur-Diagramms
- geringe und gemessene Exothermie aufgrund geringer eingesetzter Harzmenge
- Untersuchung hochreaktiver Harzsysteme möglich
- Erfassung von Volumenänderung, Zeit und Temperaturen, deshalb Auswertung über gesamte Vernetzungsreaktion und Abkühlung des Matrixmaterials möglich
- Aufteilung der Gesamtschwindung in chemische und thermische Schwindung möglich

Somit bietet die vorliegende Messmethode in Erweiterung der vorhandenen Methoden die Möglichkeit, den Schwindungsverlauf für hochreaktive Matrixsysteme über den gesamten Reaktionsverlauf und der Abkühlung auf RT zu ermitteln. Würden bisher vor allem Punktwerte für die Schwindung und quantitative Aussagen zum Schwindungsverlauf angegeben, so können jetzt durchgängige qualitative Ergebnisse erzielt werden. Die Volumenänderung des EP-Materials wird hier direkt erfasst und nicht durch Schwindungsbehinderung oder Umrechnung verfälscht. Die vorliegenden Ergebnisse sind in der Größenordnung der Werte, die in der Literatur für andere EP-Harzsysteme, Verarbeitungsbedingungen und Messmethoden angegeben werden. Auch die Aufteilung auf chemische und thermische Schwindung stimmt in ihrer Größenordnung mit den Aussagen aus der Literatur überein. Deshalb kann die hier neu entwickelte Methode zur Schwindungsmessung als plausibel und können ihre Ergebnisse als realistisch angesehen werden.

## 6.6 Vergleich der EP-Systeme untereinander

In der Predicted-Response-Grafik in Abbildung 6.7 sind beim Vergleich der einzelnen Harzsysteme untereinander Unterschiede für die Schwindungsanteile und die Gesamtschwindung erkennbar. Bei der gewählten Einstellung zeigt das Harzsystem B2 die geringste chemische Schwindung und das Harzsystem B3 die geringste thermische Schwindung. Die Gesamtschwindung bei ca. 100 °C Aushärtetemperatur und ca. 30 min Aushärtezeit liegt für beide



Systeme ähnlich niedrig. Das Harzsystem A1 hat im Vergleich die höchsten Werte sowohl für die chemische als auch für die thermische Schwindung.

Auch bei einer weiteren Einstellung von Aushärtetemperatur und -zeit bestätigt sich diese Reihenfolge für die Gesamtschwindung:

- Harzsystem A1 zeigt die höchsten Werte für die Verarbeitungsschwindung (z.B. 8,1 % bei 120 °C / 30 min).
- Harzsystem D5 und Harzsystem C4 liegen beide bei einem mittleren Niveau (6,0 % und 5,9 % bei 120 °C / 30 min).
- Harzsystem B2 und B3 zeigen beide eine geringe Verarbeitungsschwindung (5,0 % und 4,8 % bei 120 °C / 30 min).

Allerdings ist der Vergleich der Harzsysteme für gleiche Temperaturen und Zeiten nicht vollständig. Da die Reaktivität der Systeme verschieden ist, müssen die Schwindungsanteile bei Aushärtezyklen verglichen werden, welche gleiche Aushärtegrade oder  $T_g$  in der gleichen Zeit produzieren. Dies bedingt für alle Harzsysteme unterschiedliche Aushärtetemperaturen zum direkten Schwindungsvergleich. Mit einer solchen Betrachtungsweise kommt die Reaktivität der Harzsysteme und die Forderung nach kurzer Zykluszeit zur Geltung. In Kapitel 4.2.3 sind die Reaktivitäten der untersuchten Harzsysteme anhand zahlreicher DSC-Messungen verglichen worden. Die Harzsysteme D4 und C5 haben langsamere Aushärtungsreaktionen als die Harzsysteme A1 und B2. Da beim Harzsystem B3 ein langsamerer Härter eingesetzt wird als beim Harzsystem B2, ist auch hier die Reaktivität geringer. Die Harzsysteme mit geringerer Reaktivität B3, C4 und D5 schneiden in einem Vergleich der Schwindungsbeträge, welcher die Zykluszeit berücksichtigt, schlechter ab. Daher beschränkt sich die weitere Betrachtung auf die Harzsysteme A1 und B2.

Zum Vergleich der Harzsysteme A1 und B2 bietet sich eine Stichprobe für die Erzeugung eines  $T_g$  von 80 °C innerhalb von 30 min an. Hierzu ist für das Harzsystem A1 eine Aushärtetemperatur von ca. 74 °C notwendig. Mit dem Harzsystem B2 wird dieser  $T_g$  bei einer Temperatur von ca. 68 °C innerhalb von 30 min erreicht. Das Modell liefert hier Werte für die Gesamtschwindung von 5,06 % für A1 und 3,30 % für B2.

Ein weiterer Vergleich kann für die Entformbarkeit nach 10 min erfolgen. Hierzu ist für das Harzsystem A1 eine Verarbeitungstemperatur von ca. 100 °C notwendig, für Harzsystem B2 von ca. 80 °C. Das Regressionsmodell liefert für die Gesamtschwindung die Vorhersage von 6,12 % für A1 und 3,66 % für B2 (das Versuchsergebnis für B2 ist 3,70%). Allerdings sind die erwarteten  $T_g$  auch sehr verschieden, da sie den Verarbeitungstemperaturen von 100 °C für A1 und ca. 80 °C für B2 entsprechen.

Es wird also bei verschiedenen Betrachtungsweisen die Reihenfolge der Harzsysteme nach auftretender Verarbeitungsschwindung nicht verändert, sondern bestätigt. Das Harzsystem B2 mit beschleunigtem Härter zeigt nach den vorliegenden Untersuchungen die niedrigste Schwindung bei verschiedenen Temperaturen und Aushärtezeiten. Diese Ergebnisse bestätigen den

Materialvergleich der Harzsysteme über die gemessene Oberflächenqualität in Kapitel 4.2.3. Hier zeigte ebenfalls das System B2 im Vergleich zu den anderen betrachteten EP-Systemen geringere Werte für die Lang- und Kurzzeitigkeit, was auf eine niedrigere Verarbeitungsschwindung schließen lässt.

Diese gute Übereinstimmung der Erkenntnisse aus den Hardware-Versuchen im RTM-Verfahren und aus den Laborversuchen an reinen EP-Systemen ermöglicht eine wesentliche Reduktion des Versuchsaufwands zur Charakterisierung der Oberflächenqualität verschiedener Harzsysteme. Durch die Bestimmung des Schwindungsverhaltens im Labor mit Hilfe der neu entwickelten Schwindungsmesszelle kann auf die aufwendige Herstellung von mehreren Musterplatten für jedes einzelne Matrixsystem verzichtet werden. Um die Oberflächenqualität von RTM-Musterteilen reproduzierbar herstellen und beurteilen zu können, ist ein hoher Aufwand bei der Werkzeug- und Anlagentechnik und der Prozessführung notwendig. Weiterhin zeigen sich im Laborversuch auch bereits die Einflüsse von Aushärtetemperatur und -zeit, um das Prozessfenster für den RTM-Prozess einzugrenzen.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird das Harzsystem B2 als das mit dem größten Potenzial zum Erreichen hoher Oberflächenqualität favorisiert. Durch die niedrigere Verarbeitungsschwindung bei gleichzeitig hoher Reaktivität können die Anforderungen an automobiler Außenhautbauteile in einem serientauglichen RTM-Prozess am besten erfüllt werden.

## 6.7 Umsetzung auf die Prozessführung

Bei der Betrachtung der Schwindungsergebnisse darf nicht vergessen werden, dass die Messungen mit der neuen Methode an Reinharz-Proben unter bestimmten Randbedingungen, z.B. ohne aufgetragenen hydrostatischen Druck, durchgeführt wurden. Die Ergebnisse stellen die Volumenänderung des reinen Matrixmaterials dar, nicht jedoch die eines Verbundwerkstoffs im Zusammenwirken von Fasern und Matrix. Zum einen kann der Reaktionsverlauf des EP-Systems durch die Faserverstärkung behindert werden, da sich an deren Oberfläche reaktive Enden der Moleküle anlagern und zur Bildung des räumlichen Netzwerks fehlen. Bei der Schwindung des Matrixmaterials im Verbund mit Faserhalbzeugen entstehen zudem erhebliche Spannungen an der Faser-Matrix-Grenzschicht aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens. Diese inneren Spannungen im Verbundmaterial und die unterschiedlichen Randbedingungen für die Volumenänderung in der Fläche der Faserverstärkung (x-y-Richtung) und senkrecht dazu (z-Richtung) führen zu verschiedenen tatsächlichen Dehnungen des Matrixmaterials bei der Schwindung. Durch die Schwindungsbehinderung in Faserrichtung ist eine starke Überhöhung der Schwindung in Dickenrichtung zu beobachten. Diese Überhöhung kann ein Vielfaches der Schwindung in Faserrichtung betragen und auch die lineare Schwindung des reinen Matrixmaterials übertreffen (siehe [105] und [30]).

Dennoch kann eine Übertragung der Erkenntnisse auf die zu erwartende Oberflächenqualität der RTM-Bauteile erfolgen. Obwohl der tatsächliche Betrag der Schwindung in Dickenrichtung von zahlreichen Parametern wie Fasermaterial, -orientierung, Faservolumengehalt und Bauteil-

dicke abhängt, besteht ein direkter Zusammenhang zur Schwindung des reinen Matrixmaterials. Je kleiner diese gemessene Schwindung ist, desto geringer werden sich die Faserstrukturen an der Oberfläche des Bauteils abzeichnen.

Welche Anteile der hier gemessenen Verarbeitungsschwindung tatsächlich im RTM-Prozess auftreten, hängt von der Art des Verfahrens ab. Wird das Matrixmaterial wie bei den vorliegenden Schwindungsmessungen ohne Druck und ohne Faserhalbzeuge im Werkzeug vernetzt, ist tatsächlich eine solche Volumenänderung zu erwarten. Der hier aufgebrauchte Nachdruck bewirkt aber eine zusätzliche Komprimierung des flüssigen Matrixmaterials, welche die Schwindung in der flüssigen Phase zum Teil ausgleichen kann. Ist der Druck hoch genug, führt die gesamte Reaktionsschwindung bis zum Gelieren der Matrix nur zu einer Druckverringering in der Kavität und nicht zu einer tatsächlichen Volumenverringering des Matrixmaterials. Dieser Ausgleich der Schwindung durch das Aufbringen von Druck kann auch durch das Zufahren eines Werkzeugspalts erfolgen, der bei der Injektion auf Übermaß steht und dann bis über das Gelieren hinaus langsam durch die Schließeinheit geschlossen wird. Sobald sich das Harzsystem in der festen Phase befindet, kann durch Überdruck kein Volumenausgleich mehr stattfinden.

Über solche Spaltversuche auf der Kunststoffbauteil-Pressen wurden Daten zur Volumenveränderung während der Vernetzung in der flüssigen Phase und Übergangsphase ermittelt. In Abbildung 6.8 sind die Pressenposition und die Schließkraft der Presse über der Zeit aufgetragen.

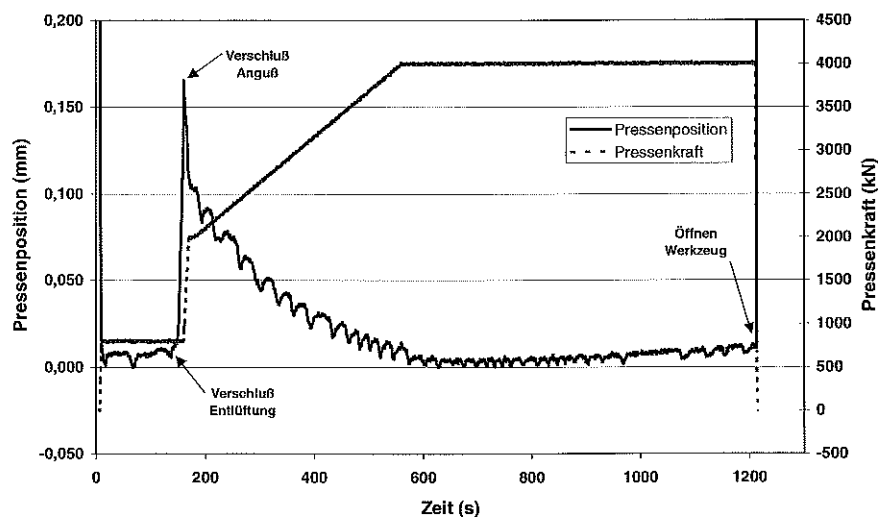


Abbildung 6.8: Verlauf der Pressenposition im RTM-Verfahren mit Nachpressen

Nach der Injektion wird über die Injektionseinheit ein hoher Überdruck in der Kavität erzeugt und das Werkzeug um ca. 0,15 mm Spalthöhe bei einer Pressenkraft von ca. 80 to aufgedrückt. Anschließend wird der Anguss verschlossen und die Pressenkraft rampenförmig auf ca. 400 to erhöht. Die obere Werkzeughälfte „schwimmt“ zunächst mit hoher Presskraft auf dem noch flüssigen Matrixmaterial, welches unter hohem hydrostatischen Druck steht. Bei einer Volumenänderung durch die Reaktionsschwindung der Matrix sinkt sie um eine Strecke ab, die durch die Wegaufnehmer der Presse gemessen werden kann. Zudem wird das Matrixmaterial im vorliegenden Fall durch die Erhöhung der Presskraft auf 400 to zusätzlich komprimiert. Bei der Pressenposition 0 ist der Spalt vollständig geschlossen und die Kavität auf Bauteildicke. Die Volumenänderung aufgrund der Reaktionsschwindung in der flüssigen Phase kann durch diese Vorgehensweise vollständig kompensiert werden.

### 6.7.1 RTM-Prozess mit konstanter Verarbeitungstemperatur

Zur Minimierung der Verarbeitungsschwindung ergeben sich nach obigen Ergebnissen aus den Schwindungsmessungen folgende Möglichkeiten:

Die Verarbeitung des Matrixsystems bei niedrigen Temperaturen bewirkt bei allen Harzsystemen eine geringere Gesamtschwindung. Die thermische Schwindung hängt mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_v - T_{RT}$  direkt über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten zusammen. Daher nimmt sie bei geringerer Verarbeitungstemperatur proportional mit  $\Delta T$  ab. Die Vernetzungsreaktion läuft bei geringeren Temperaturen langsamer ab, was nach den vorliegenden Ergebnissen zu einer schwachen Verringerung der Reaktionsschwindung führt. Das Harzsystem B2 zeigt beispielsweise bei einer Aushärtung bei 60 °C und 30 min eine Gesamtschwindung von 3,34 %, bei 100 °C hingegen schon 4,32 %.

Die Vernetzung des Matrixsystems zu niedrigeren Aushärtgraden führt bei allen Harzsystemen zu einer etwas geringeren chemischen Schwindung. Wird die Vernetzungsreaktion durch Abkühlen vor der vollständigen Aushärtung gestoppt, findet nur ein Anteil der Reaktionsschwindung statt. Die Reaktionsschwindung ist für diese Methode mit dem größtem Anteil in der Anfangsphase der Reaktion sehr ungünstig verteilt. Zudem ist die unvollständige Vernetzung und der niedrigere  $T_g$  ein großer Nachteil bei einer nur geringen Verminderung der Reaktionsschwindung. Daher bietet dieser Weg keine effektive Methode zur Verringerung der Verarbeitungsschwindung.

Für die Forderung nach minimaler Verarbeitungsschwindung bietet die niedrigste mögliche Verarbeitungstemperatur die beste Lösung. Die Entformung sollte zudem beim niedrigsten möglichen Aushärtgrad erfolgen, bei dem das Teil gerade über die nötige Entformsteifigkeit verfügt. Da dieser Lösungsvorschlag zu sehr hohen Entformzeiten führt und deshalb nicht praktikabel ist, müssen weitere Forderungen gestellt und erfüllt werden. Weiterhin führt ein niedriger  $T_g$  bei Entformung des Bauteils zu verminderter Temperaturbeständigkeit und Zeitstandqualität. Die Temperaturbelastung des Bauteils, im vorliegenden Fall ca. 100 °C, führt zu einer Mindestanforderung für den zu erreichenden  $T_g$  des Matrixmaterials. Deshalb ist der

geforderte Mindest- $T_g$  entweder direkt im RTM-Prozess oder durch nachträgliches Tempern zu erreichen. Für den RTM-Prozess ergeben sich verschiedene Alternativen zur Erfüllung der Forderung nach geringer Schwindung und gleichzeitiges Erreichen des Mindest- $T_g$ : Zum einen die Wahl der niedrigsten möglichen Verarbeitungstemperatur, bei welcher der Mindest- $T_g$  nach langer Zeit auf der Sättigungskurve gerade noch erreicht wird, zum anderen die Verarbeitung bei einer höheren Temperatur mit einer kürzeren Entformzeit bei niedrigerem Aushärtegrad. Der Wunsch nach kurzen Entformzeiten und gleichzeitig hohem  $T_g$  führt ebenfalls zu höheren Verarbeitungsschwindungen.

Die Anforderungen nach hohem Mindest- $T_g$  und kurzer Zykluszeit sind direkt gegenläufig zur Forderung nach geringer Verarbeitungsschwindung. Für eine geringe Schwindung des Matrixsystems sind also Kompromisse beim erreichbaren  $T_g$  oder der Zykluszeit des RTM-Prozesses einzugehen. Dies gilt zumindest bei einer Betrachtung der Aushärtung der Matrix allein im RTM-Werkzeug bei einer konstanten Verarbeitungstemperatur.

### 6.7.2 Zyklisch beheizbare RTM-Werkzeuge

Eine bereits angedeutete Möglichkeit bieten zyklisch beheizbare Werkzeuge. So kann die Verarbeitungstemperatur im RTM-Werkzeug je nach Reaktionsphase angepasst und ein Temperaturverlauf gewählt werden, der die Summe von Reaktions- und thermischer Schwindung minimiert. Ideal für eine schwindungsminimierte Aushärtung ist die Vernetzung bei niedriger Temperatur. Nach Übergang des Matrixsystems in den festen Zustand erfolgt eine Erhöhung der Verarbeitungstemperatur, so dass der noch stattfindende Reaktionsschrumpf größer als die thermische Ausdehnung des Matrixmaterial ist und die Aushärtung schneller abläuft. Für eine solche Prozessführung müssen die RTM-Werkzeuge schnell aufheizbar sein. Eine Lösung sind Werkzeuge mit geringer Wärmekapazität, die mittels elektrischer Heizung oder Wärmeträgerfluid schnell aufgeheizt und in kürzester Zeit wieder abgekühlt werden können. Ein Temperaturzyklus für ein solches zyklisch beheiztes Werkzeug ist in Abbildung 6.9 gezeigt.

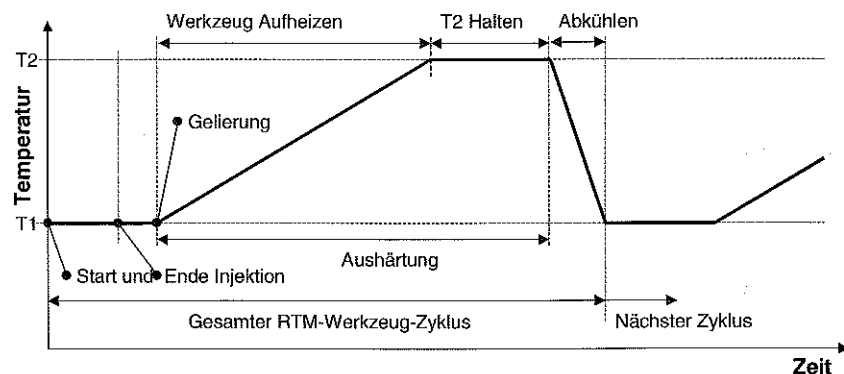


Abbildung 6.9: Mögliche Temperaturführung für ein zyklisch beheiztes RTM-Werkzeug

Neben der Werkzeugtechnik mit leichten Werkzeugen aus Materialien mit geringer Wärmekapazität ist die Verwendung zyklisch beheizter Werkzeuge auch in anderer Hinsicht anspruchsvoll. Beim Aufheizen und Abkühlen verändern sich die Kavitätsmaße und Spaltmaße des RTM-Werkzeugs gemäß der thermischen Ausdehnung des Werkzeugmaterials. Da das Matrixmaterial sich aber schon im festen Zustand befindet, wird es bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Bauteil und Werkzeug zu Verspannungen kommen.

Der Einsatz zyklisch beheizter Werkzeuge stellt einen möglichen Weg zur wirkungsvollen Verminderung der Verarbeitungsschwindung und somit auch der Faserabzeichnung an der Bauteiloberfläche dar. Die aufwändige Werkzeugtechnik und Prozessführung aber stellt eine große Hürde bei der Prozesssicheren Umsetzung dieser Methode dar.

### 6.7.3 Nachträgliches Tempern

Eine weitere Möglichkeit zum Erfüllen der beschriebenen Anforderungen an geringe Schwindung bei gleichzeitig hohem Bauteil- $T_g$  und geringer RTM-Zykluszeit bietet das nachträgliche Tempern. Im RTM-Werkzeug wird das Matrixmaterial lediglich bis zur Entformbarkeit ausgehärtet, um die Werkzeugbelegung kurz zu halten. Die weitere Vernetzung des Matrixmaterials bis zum geforderten  $T_g$  oder zur vollständigen Aushärtung erfolgt durch nachträgliches Aufheizen außerhalb des RTM-Werkzeugs in einem Temperofen. So kann zumindest die  $T_g$ -Anforderung aus dem RTM-Zyklus herausgenommen werden, was zu kürzeren Zyklen bzw. niedrigeren möglichen Verarbeitungstemperaturen führt.

Die Auswirkungen des Nachtemperns auf die Verarbeitungsschwindung werden bei Betrachtung des Dichte-Temperatur-Diagramms in Abbildung 6.10 deutlich. Hier sind schematisch die Gellierlinie sowie verschiedene Aushärtegrade eingezeichnet, die das Matrixsystem bei der Aushärtung durchläuft. Zu jedem Aushärtegrad liegt auch ein anderer aktueller  $T_g$  des Matrixsystems vor. Bei den vorliegenden EP-Harzsystemen für das RTM-Verfahren liegt der End- $T_g$  bei vollständiger Aushärtung über der Verarbeitungstemperatur. Die Bauteilentformung bei der Aushärtung kann erst erfolgen, wenn der aktuelle  $T_g$  des Matrixsystems die Verarbeitungstemperatur erreicht. Dieser frühestmögliche Zeitpunkt der Entformung ist für verschiedene Aushärtegrade als runder Punkt im Diagramm gekennzeichnet.

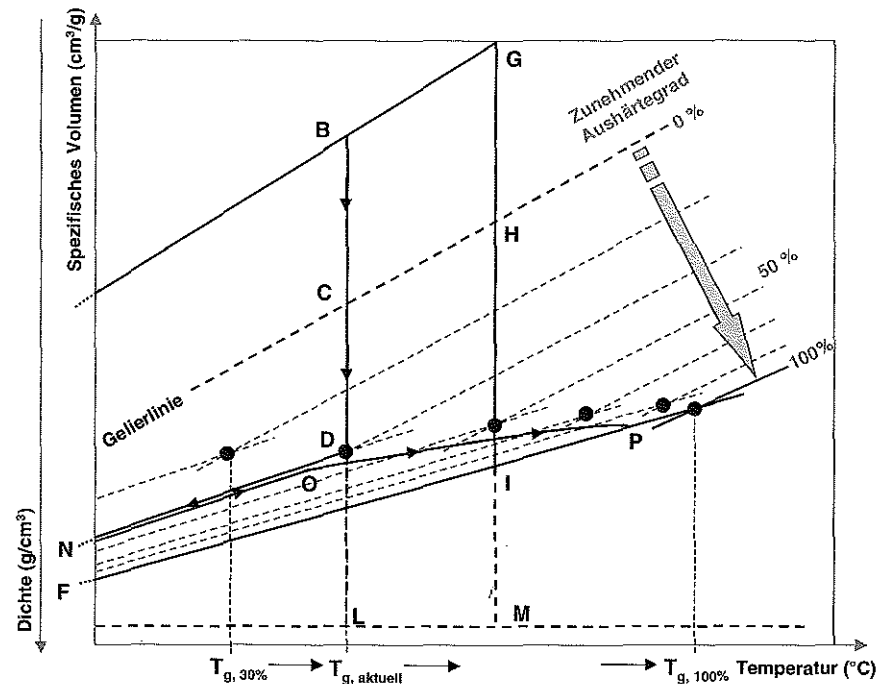


Abbildung 6.10: Nachtempern im Dichte-Temperatur-Diagramm

Wird nun im RTM-Prozess das Harzsystem bei niedriger Verarbeitungstemperatur bis zur Entformbarkeit vorvernetzt (Linienzug B-C-D), ist sein  $T_g$  relativ niedrig. Die Bauteilabkühlung erfolgt entlang der Linie D-N bis zur Raumtemperatur. Beim Nachtempern wird das Bauteil bei der Starttemperatur O unterhalb des aktuellen  $T_g$  im Temperofen eingebracht. Der Temperaturzyklus verläuft nach einem Temperatur-Zeit-Profil derart, dass der aktuelle  $T_g$  im Matrixmaterial immer höher liegt als die aktuelle Ofentemperatur. Dieses Tempern verläuft in Abbildung 6.10 entlang der Linie O-P ohne Erweichung der Matrix. Die Nachvernetzung des Matrixmaterials führt dabei immer zu einem höheren Vernetzungsgrad, als für eine Entformung des Materials bei der aktuellen Tempertemperatur notwendig wäre. Die Molekülstruktur und die Form des Matrixmaterials bleiben deshalb erhalten, weshalb die thermische Ausdehnung aufgrund der Erwärmung reversibel bleibt. Nach der Abkühlung auf RT entlang der Linie O-F ist die gesamte Verarbeitungsschwindung aus der flüssigen Phase gleich der Strecke B-L. Für einen vergleichbaren RTM-Prozess, der einen höheren  $T_g$  direkt im RTM-Werkzeug erreicht, entspricht die Verarbeitungsschwindung der längeren Strecke G-M.

Wenn das Tempern zu schnell durchgeführt wird, kann der aktuelle  $T_g$  des Matrixmaterials überschritten werden und das Material erweichen. Dann kommt es durch das Tempern zu einer nachträglichen Schwindung mit neuer Reaktionsschwindung und höherer thermischer Schwin-

dung. Die thermische Ausdehnung des teilweise ausgehärteten Matrixmaterials bei der Erwärmung im Temperofen ist nur solange reversibel, wie das Material nicht erweicht und sich nicht irreversibel entspannen kann. Diese Betrachtung stützt die Ergebnisse zum Tempern aus Kapitel 5.7.3, die ein sehr langsames Aufheizen zur Vermeidung einer nachträglichen Verschlechterung der Oberfläche fordern. Das Tempern von Bauteilen mit bereits hohem  $T_g$  führt zusätzlich zu Veränderungen der Oberfläche aufgrund innerer Spannungen, die während der schnellen Vernetzungsreaktion im Matrixmaterial eingefroren worden sind.

## 6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Da die Volumenschwindung des Matrixsystems bei der Verarbeitung im RTM-Verfahren eine Hauptursache für das Faserdurchzeichnen an der Bauteiloberfläche ist, wurde im vorliegenden Kapitel eine aufwändige Untersuchung des Schwindungsverhaltens von ausgesuchten EP-Systemen durchgeführt. Zur Erfassung des Volumenverlaufs, der Schwindungsanteile und der Gesamtschwindung über den gesamten Herstellungsprozess wurde eine neuartige Schwindungsmesszelle entwickelt. Mit dieser neuen Versuchsanordnung konnten die Schwierigkeiten anderer Messverfahren, für hochreaktive duromere Systeme die Volumenänderung über den Reaktionsverlauf zu bestimmen, überwunden werden.

Diese neu entwickelte Methode ermöglicht die Bestimmung der Volumenänderung des Matrixsystems, bedingt durch Aufheizen, chemische Reaktion und Abkühlung auf RT, für verschiedene Harzsysteme und bei verschiedenen Verfahrenseinstellungen im Labor.

Mit den Ergebnissen aus den Schwindungsmessungen wurde ein Regressionsmodell für die Schwindungsanteile in Abhängigkeit vom Harzsystem, der Aushärtetemperatur und -zeit erstellt. Aufgrund der hohen Modellgüte und der geringen Streuung der Messwerte konnte das Schwindungsverhalten sehr gut und mit engen Vertrauensbereichen beschrieben werden. Im Vergleich der Matrixsysteme zeigte das Harzsystem B2 die niedrigste Gesamtschwindung bei gleichzeitig hoher Reaktivität. Weiterhin konnten die Abhängigkeiten der thermischen und chemischen Schwindung von Aushärtetemperatur und -zeit quantifiziert werden. Dies führte zu einer klaren Favorisierung von niedrigen Aushärtetemperaturen für eine möglichst geringe Verarbeitungsschwindung.

Da diese Ergebnisse sehr gut mit den Hardware-Versuchen mit RTM-Musterbauteilen übereinstimmen, kann für zukünftige Untersuchungen der Versuchsaufwand reduziert werden. Über den Vergleich des Schwindungsverhaltens im Labor können aufwendige RTM-Versuche zum Vergleich der Oberflächenqualität verschiedener Harzsysteme zunächst entfallen. Die unterschiedlichen Randbedingungen für die Volumenschwindung in Laborversuch und RTM-Musterbauteil (z.B. Faserverstärkung, Nachdruck auf Matrixmaterial) verhindern allerdings die direkte quantitative Aussage über die Amplituden der Abzeichnungen an der Bauteiloberfläche.

Für die RTM-Prozessführung ergeben sich einige Konsequenzen zum Erreichen einer hohen Oberflächenqualität. Bei konventioneller Werkzeugtechnologie mit konstanter Werkzeugtempe-

ratur sind zur Verminderung der Verarbeitungsschwindung niedrige Temperaturen zielführend. Weiterhin kann mit Nachdruck die Reaktionsschwindung bis zum Erreichen der festen Phase ausgeglichen werden. Damit hier die größte Volumenverminderung kompensiert werden kann, ist ein Aufbringen des Nachdrucks so früh wie möglich nach der Injektionsphase notwendig. Eine weitere Möglichkeit der Reduzierung der Verarbeitungsschwindung ist die Verwendung von zyklisch beheizten Werkzeugen. Zur Verringerung der Reaktionsschwindung wird das Matrixmaterial bei niedrigen Temperaturen vernetzt und dann zur Erreichung ausreichend hoher Aushärtegrade bei hohen Temperaturen vollständig ausgehärtet.

Da bei niedrigen Aushärtetemperaturen die Glasübergangstemperatur des Matrixmaterials nach dem RTM-Schritt meist noch nicht den Temperaturanforderungen an das Bauteil genügt, kann ein nachträgliches Tempern notwendig sein. Anhand des Dichte-Temperatur-Diagramms wurde der Einfluss des Temperns auf die Volumenschwindung des Matrixsystems erklärt und eine zielführende Temperstrategie aufgestellt.

## 7 Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität

Neben einer Vermeidung oder Minimierung von Faserdurchzeichnungen können auch Maßnahmen ergriffen werden, um die vorliegenden Oberflächenstörungen durch „Abdecken“ zu mildern oder zu beheben. Durch den Einsatz zusätzlicher Materialschichten sollen sowohl das Faserabzeichnen als auch andere Defekte wie z.B. Poren abgedeckt und eliminiert werden. Diese ergänzenden Maßnahmen zählen zur Symptombekämpfung und sind mit zusätzlichem Aufwand während des RTM-Prozesses oder danach verbunden. Die Fähigkeit, mit einer Materialschicht die vorhandene Oberflächenstruktur abzuschwächen oder zu überdecken, wird im Folgenden als „Abdeckungsvermögen“ bezeichnet.

### 7.1 Beschichtungen im RTM-Prozess

Im RTM-Prozess selbst können Deckschichten an der Bauteiloberfläche eingesetzt werden, welche die durch Schrumpfung entstehenden Faserabzeichnungen und andere Oberflächendefekte abdecken. Mit solchen „Prozess-Deckschichten“ sind Verfahrensschritte gemeint, welche zu einem fertig beschichteten RTM-Bauteil bei der Entformung aus dem RTM-Werkzeug führen. Im Gegensatz zu den nachgeschalteten Beschichtungsmethoden verlängert eine Prozess-Beschichtung den Werkzeugzyklus.

Allen Prozess-Deckschichten gemein ist die Applikation vor der Entformung aus dem Werkzeug. Nach der Injektion und Aushärtung des Matrixmaterials stellt diese Schicht die Bauteiloberfläche auf der Sichtseite dar. Dabei gilt für alle Prozess-Deckschichten die im Folgenden beschriebene Einschränkung bei der Abdeckung von Oberflächenstrukturen des Bauteils. Die Vorgänge, die das Abdeckungsvermögen solcher Schichten limitieren, sind in Abbildung 7.1 schematisch gezeigt.

Verschiedene Beschichtungen werden vor dem eigentlichen RTM-Prozess ins offene Werkzeug eingebracht. Erst danach findet im Werkzeug die Bauteilherstellung statt, bei welcher die Beschichtung einen stofflichen Verbund mit dem Matrixsystem eingeht. Spätestens nach der Gelierung haftet die Beschichtung am Matrixsystem und folgt der Volumenveränderung durch die Reaktionsschwindung. Die Oberflächenveränderung durch diese Schwindung des Matrixsystems kann von der Beschichtung nicht abgedeckt werden. Selbst bei Einbringen der Beschichtung ins Werkzeug nach der RTM-Bauteilherstellung vor der Entformung bleibt immer noch die Oberflächenveränderung aufgrund der thermischen Schwindung, die von der Schicht nicht beeinträchtigt wird.

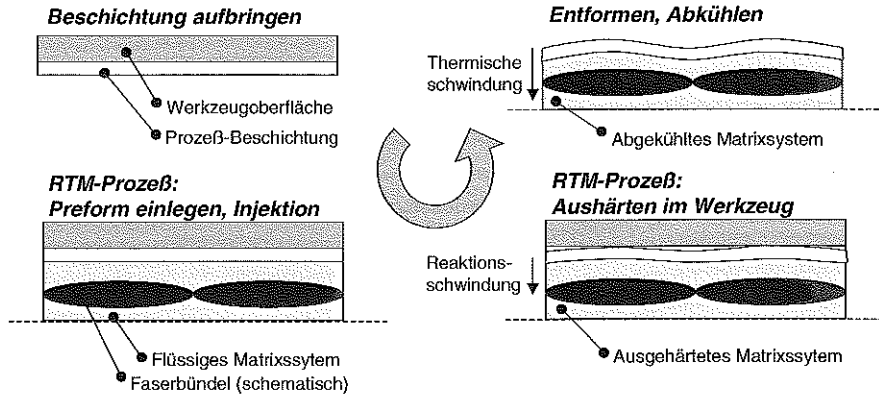


Abbildung 7.1: Abzeichnung von Oberflächenstrukturen bei Prozess-Deckschichten

Theoretisch kann die Werkzeugoberfläche nur von solchen Schichten perfekt nachgebildet werden, die ohne eine erhöhte Werkzeugtemperatur auskommen und deshalb keine Temperaturdifferenz zu RT und keine thermische Schrumpfung des Bauteils überwinden müssen.

### 7.1.1 Thermoplastische Folien

Das Hinterspritzen von thermoplastischen Folien zählt in der Spritzgusstechnologie mit unverstärkten Thermoplasten zum Stand der Technik. Die Folientechnologie zur Beschichtung von Kunststoffbauteilen ist in der Literatur unter anderem in [18], [41], [77] und [48] beschrieben. In [35] und [92] werden dazu Anwendungen für Außenhautbauteile in der Automobilindustrie aufgezeigt. Bei der Folientechnologie werden vorgefertigte Folien mit bereits aufgetragenen Lackschichten (Lackträgerfolien), Dekor oder anderer spezieller Funktion direkt im Werkzeug hinterspritzt.

Diese Technologie ist prinzipiell auf das RTM-Verfahren übertragbar, in welchem ebenfalls das flüssige Matrixmaterial in die Kavität gespritzt wird und dort zum Bauteil aushärtet (siehe Abbildung 7.2). Größter Unterschied ist die Faserverstärkung in der Kavität, die im Injektionsprozess vom Matrixmaterial durchdrungen wird. Wie beim Hinterspritzen von Folien im Thermoplastspritzguss auch wird zunächst die Folie ins Werkzeug eingebracht. Die Umformung der Folie auf Bauteilgeometrie kann wie bei der konventionellen Folientechnik durch Stempelumformen oder Vakuum geschehen. Nach dem Umformen der Folie auf die gewünschte Oberflächenform folgen die Schritte des konventionellen RTM-Verfahrens.

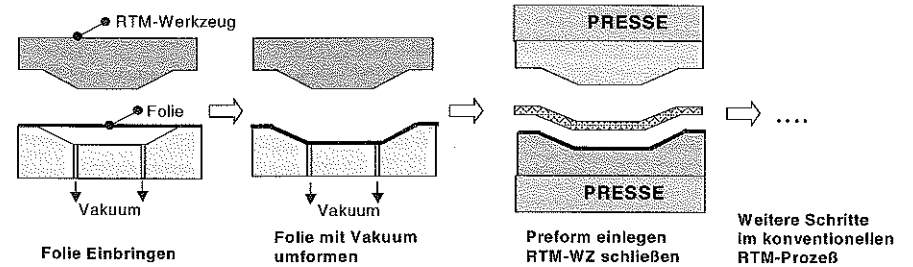


Abbildung 7.2: Zusätzliche Verarbeitungsschritte bei der Verwendung von Folien in der Vakuumtechnik im RTM-Prozess

Für diese Folientechnologie kommen nur eine begrenzte Zahl von thermoplastischen Folienmaterialien in Frage. Die Folie muss die Verarbeitungstemperaturen im RTM-Verfahren und bei nachgeschaltetem Tempern mindestens über die Prozesszeit unbeschadet überstehen. Ferner ist eine hohe Dehnfähigkeit gefordert, welche die notwendigen Umformgrade für dreidimensionale Bauteile ohne Ausreißen oder Faltenbildung ermöglicht. Diese Anforderungen sind ähnlich der Folientechnologie beim konventionellen Hinterspritzen.

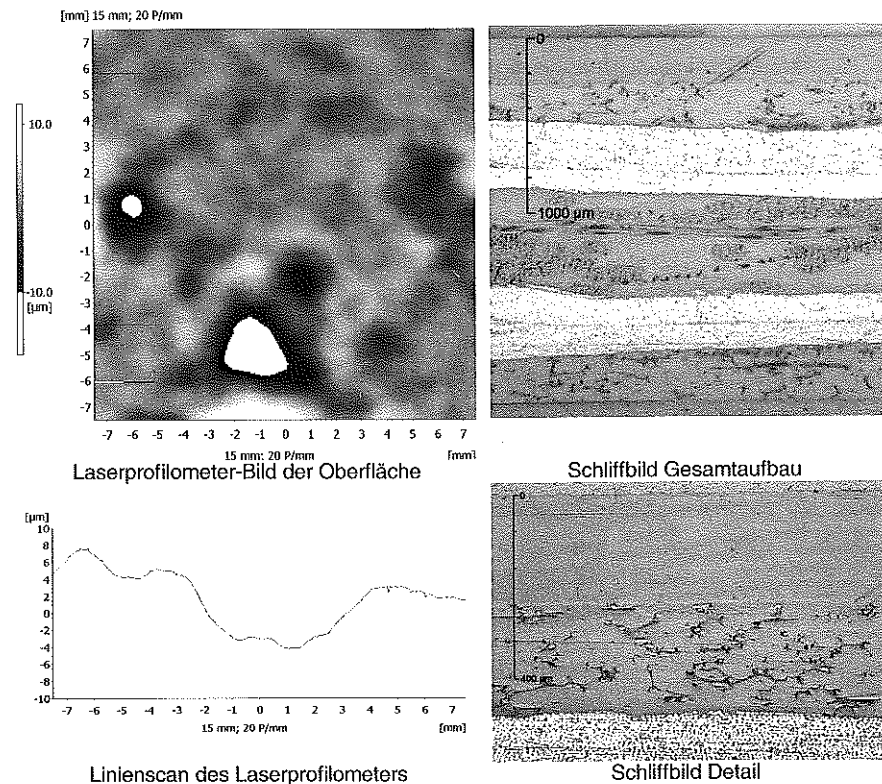
Um das Potenzial dieser Technologie zu untersuchen, wurden RTM-Versuche im Plattenwerkzeug mit verschiedenen Folien durchgeführt. Dabei blieb die Frage der Umformbarkeit und die damit verbundenen Anforderungen zunächst außer acht. Für die Folienversuche wurden die eingesetzten Faser- und Matrixmaterialien sowie die Einstellungen des RTM-Prozesses gleich gehalten. In Tabelle 7.1 sind die Materialien und Dicken einiger im RTM-Verfahren untersuchter Folien aufgelistet.

Tabelle 7.1: Im RTM-Verfahren hinterspritzte Folien (Auszug)

Folie	Material	Dicke (µm)
PET 200	Polyethylenterephthalat	200
PMMA 250	Polymethylmethacrylat	250
PC 200	Polycarbonat	200
PC 100	Polycarbonat	100
PA 6.6 100	Polyamid 6.6	100

Einige thermoplastische Folien waren aufgrund der schlechten Haftung zum Epoxidharz nicht verarbeitbar. Obwohl das Epoxidharz im Grunde wie ein Zweikomponenten-Kleber sehr gut an fast allen Oberflächen haften kann, sind doch die Oberflächen einiger Thermoplaste so unpolar, dass die Haftung schlecht ist. Bei den Versuchen wurden die Oberflächen der Thermoplastfolien allerdings nicht durch Zusatzmaßnahmen aktiviert, wie es z.B. vor einer Lackierung bei bestimmten Materialien zur Erhöhung der Haftfähigkeit üblich ist. Bei den Folien aus PET kam es aufgrund der hohen Werkzeugtemperatur zur Rekristallisation und einer rauen Oberfläche mit körniger Eigenstruktur. Die PMMA-Folien erweichten bei Kontakt mit der heißen Werkzeugoberfläche so stark, dass ein flaches Ablegen ohne das Einschließen von Luft unter der Folie nicht möglich war.

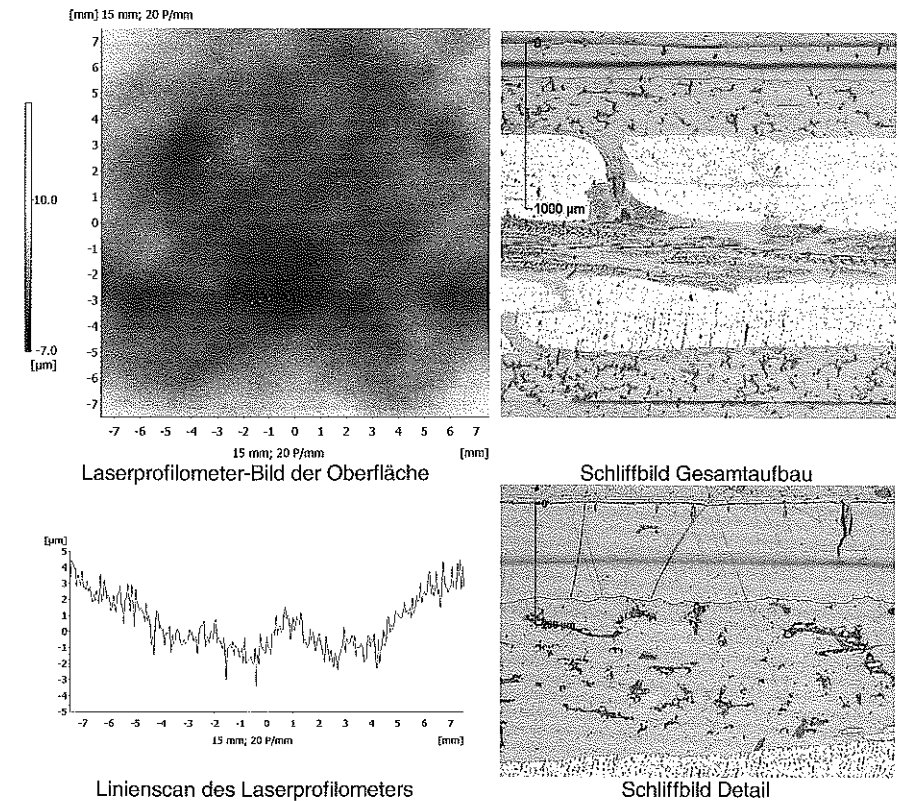
Zudem haben einige der Folien eine matte Oberfläche, was die Beurteilung nach der Lang- und Kurzwelligkeit mit dem Wave-Scan-Messgerät unmöglich macht. Daher kommt zur Betrachtung der Oberflächenstruktur verstärkt das Laserprofilometer zum Einsatz. In Abbildung 7.3 ist die Oberfläche eines Musterteils mit PMMA-Folie der Dicke 250  $\mu\text{m}$  dargestellt. Weiterhin sind Mikroskopie-Schliffbilder für die Gesamtansicht und eine Detailaufnahme des Randbereichs gezeigt. Die starken Oberflächenstörungen aufgrund der unsauberen Auflage der Folie auf der Werkzeugoberfläche sind deutlich zu erkennen. Die eingeschlossene Luft zwischen Werkzeug und Folie führt zu starken Einfallstellen, die tiefer als 10  $\mu\text{m}$  sind. Weiterhin ist trotz der großen Dicke von 250  $\mu\text{m}$  die  $\pm 45^\circ$ -Richtung der Faserverstärkung zu erkennen.



**Abbildung 7.3:** Bilder aus Laserprofilometrie und Mikroskopie für Versuchsteil mit Folie PMMA 250

Abbildung 7.4 zeigt die Oberfläche und Schliffbilder eines Musterbauteils mit PC-Folie in der Dicke 200  $\mu\text{m}$ . Die Folie hat eine raue, matte Oberfläche, was sowohl im Oberflächenbild als auch am Linienscan ersichtlich ist. Das verminderte Reflexionsvermögen der Oberfläche verhindert eine Beurteilung mit dem Wave-Scan-Gerät. Im Oberflächenbild ist schwach die

$\pm 45^\circ$ -Richtung der Faserverstärkung zu erkennen. Im Linienscan findet sich die kurzwellige Struktur der rauhen Folie mit Amplituden von 1 bis 2  $\mu\text{m}$  und die langwellige Struktur der Faserverstärkung mit 2 bis 3  $\mu\text{m}$  wieder. Die Folie zeigt an der Außenseite feine Risse von bis zu 100  $\mu\text{m}$  Tiefe.



**Abbildung 7.4:** Bilder aus Laserprofilometrie und Mikroskopie für Folie PC 200

Die Oberfläche einer glatten PC-Folie der Dicke 100  $\mu\text{m}$  ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Hier hat die Oberfläche aufgrund der glatten Folie eine sehr geringe Rauheit. Die Faserstrukturen sind aber dennoch deutlich sichtbar. Da sich diese Folie bei der Verarbeitung statisch auflädt und Staubpartikel anzieht, wurden an der Oberfläche einige Verschmutzungen eingeschlossen, die zu punktförmigen Einfallstellen führen. Das Abdeckungsvermögen dieser dünneren PC-Folie mit 100  $\mu\text{m}$  ist geringer als das der PC-Folie mit 200  $\mu\text{m}$ , da die Faserstrukturen klarer im Oberflächenbild zu erkennen sind.

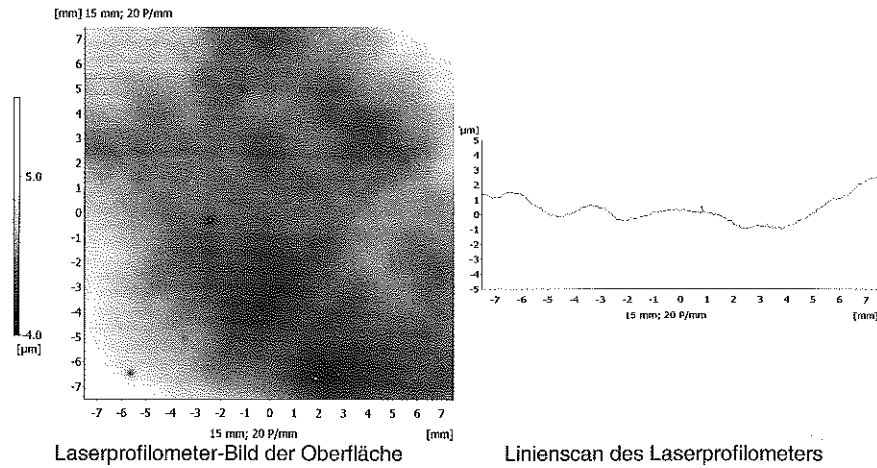


Abbildung 7.5: Bilder aus Laserprofilometrie für Versuchsteil mit Folie PC 100

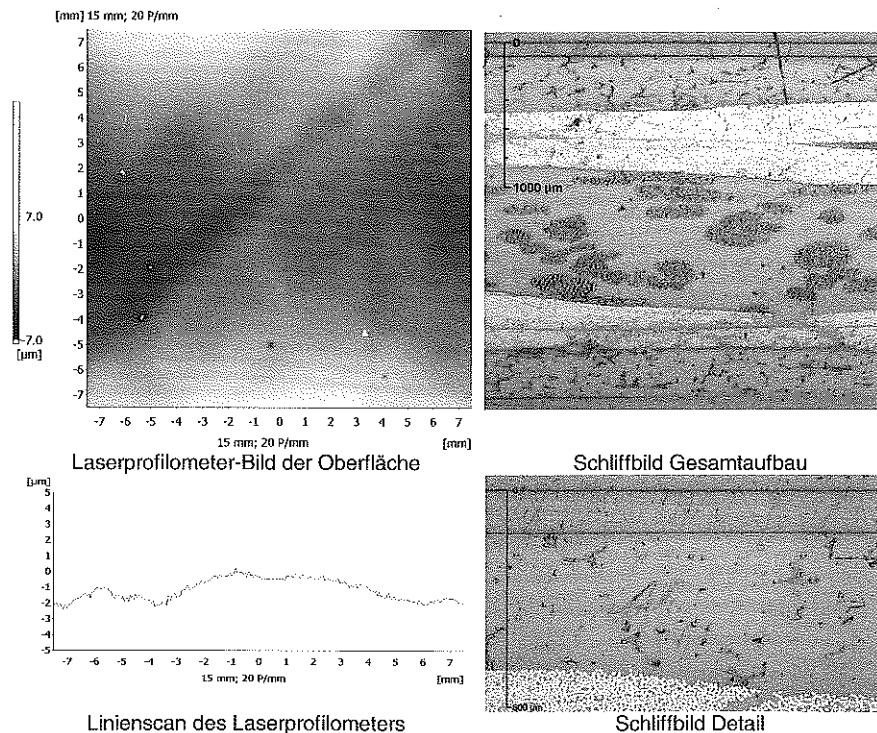


Abbildung 7.6: Bilder aus Laserprofilometrie und Mikroskopie für Folie PA 6.6 100

Abbildung 7.6 zeigt das Ergebnis für die Folie aus PA 6.6 in einer Dicke von 100 µm. Auch hier entsteht aufgrund der statischen Aufladung das Problem mit eingeschlossenen Staubpartikeln. Das Abdeckungsvermögen ist besser als bei den PC-Folien, was sowohl im Oberflächenbild als auch im Linienscan erkennbar ist.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Folientechnologie im RTM-Verfahren Potenzial zur Verbesserung der Oberflächenqualität hat. Neben der Abschwächung des Faserdurchzeichnens bieten die Folien insbesondere die zusätzliche Möglichkeit, Poren an der Oberfläche des RTM-Bauteils für eine nachträgliche Lackierung abzudecken. Obwohl in den durchgeführten RTM-Versuchen die Bauteile unter den reproduzierbaren Versuchsbedingungen porenfrei waren, kann im geplanten Serienprozess Porosität an der Oberfläche als Problem auftreten und zu hohen Ausschussquoten führen. Durch die Verwendung von ausreichend dicken und steifen Folien könnten solche Oberflächendefekte eliminiert und die Prozesssicherheit erhöht werden. Weiterhin bietet ebenso wie in der Spritzgusstechnologie der Einsatz von Lackträgerfolien die Möglichkeit, direkt im RTM-Prozess fertig lackierte Bauteile herzustellen. Durch den Entfall der aufwendigen nachträglichen Lackierung können so neben der Oberflächenegalisierung durch die Folien große wirtschaftliche Vorteile entstehen.

Um dieses Potenzial richtig einschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen zur Umformbarkeit verschiedener TP-Folien, zum tatsächlichen Abdeckungsvermögen von Faserdurchzeichnen und Porosität, zur Matrix- und Lackhaftung nach Aktivierung und zur Vermeidung von statischer Aufladung notwendig. Der Einsatz von thermoplastischen Folien im RTM-Verfahren wird nach den hier vorliegenden ersten Erkenntnissen als eine mögliche Technologie mit großem Potenzial bei gleichzeitig hohem Risiko zum Erreichen von Außenhautqualität eingeschätzt.

### 7.1.2 Gel-Coat

Ein weiteres Verfahren zur Beschichtung im RTM-Verfahren bietet die Verwendung von „Gel-Coats“ (siehe [99], [54] und [84]). Ein reaktives Harzsystem wird im Sprühverfahren flüssig ins offene Werkzeug auf die Sichtseite eingebracht. Zur Verwendung kommen fast ausschließlich ungesättigte Polyesterharze, die mit Isophthalsäure oder Orthophthalsäure modifiziert werden. Die aufgesprühte flüssige Schicht bildet die Kavitätsoberfläche exakt ab, während sie geliert oder anhärtet. Nach einer kurzen Wartezeit werden die Verstärkungshalbezeuge eingelegt und das RTM-Verfahren im konventionellen Ablauf gestartet. Der Gel-Coat bildet so am fertigen Bauteil die Oberfläche der Sichtseite in der vorher ins Werkzeug eingespritzten Schichtdicke. Nachteilig bei den Gel-Coats ist der Prozessschritt am offenen Werkzeug, da durch die gängigen Gel-Coat-Systeme auf Polyester-Basis flüchtiges Styrol freigesetzt wird. Die Gel-Coat-Technologie zählt zum Stand der Technik bei der FVK-Herstellung, insbesondere bei Außenhautbauteilen und im Bootsbau.

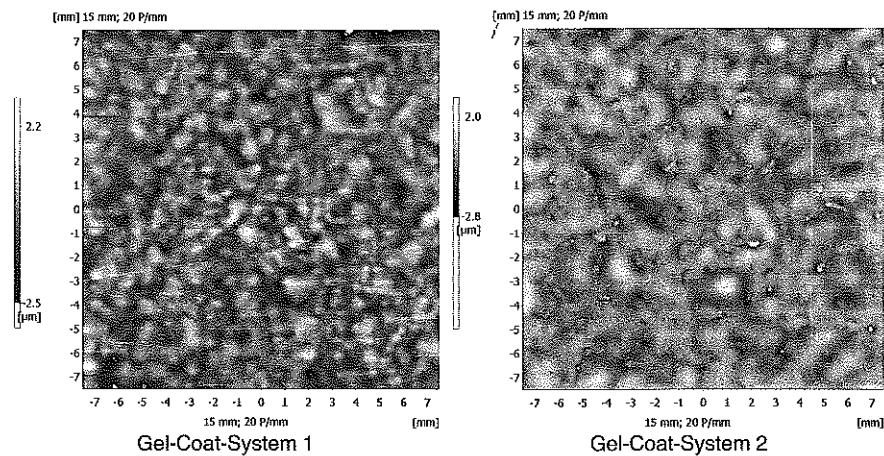
Während im Bootsbau die Schichtdicken der Gel-Coats mindestens 400 bis 600 µm betragen, soll aus Gründen der Gewichtseinsparung in der vorliegenden Untersuchung mit einer Bauteil-



dicke von 2 mm eine Schichtdicke von maximal 200  $\mu\text{m}$  nicht überschritten werden. Die Verwendung von polymeren Zusatzschichten führt zu einer Zunahme des Flächengewichts von ca. 100  $\text{g}/\text{m}^2$  pro 100  $\mu\text{m}$  Schichtdicke, wenn diese in der Kavitätshöhe berücksichtigt ist. Ein Gel-Coat mit 200  $\mu\text{m}$  Dicke steigert demnach das Flächengewicht von ca. 3000  $\text{g}/\text{m}^2$  um ca. 200  $\text{g}/\text{m}^2$ , also um ca. 7 %.

Nach einer Vorauswahl wurden drei Gel-Coat-Systeme untersucht, die in geringen Schichtdicken < 200  $\mu\text{m}$  verarbeitbar sind. Eine weitere Anforderung ist die Verarbeitbarkeit bei hohen Werkzeugtemperaturen, damit ein direkter Anschluss des RTM-Verfahrensschrittes mit den ausgewählten reaktiven Harzsystemen möglich ist. Die Applikation auf eine Seite des Plattenwerkzeugs erfolgte im Versuchsstadium mittels einer Handsprühpistole. In einer Serienfertigung ist ein Auftrag ins Werkzeug durch Sprühautomaten zur Erzeugung gleichmäßiger und reproduzierbarer Schichtdicken erforderlich.

Die Oberflächen von Musterplatten mit zwei verschiedenen Gel-Coats sind beispielhaft in Abbildung 7.7 gezeigt. Das RTM-Werkzeug war bei der Applikation der Gel-Coats auf ca. 75°C temperiert, was durch den nachfolgenden RTM-Prozess gefordert wird.

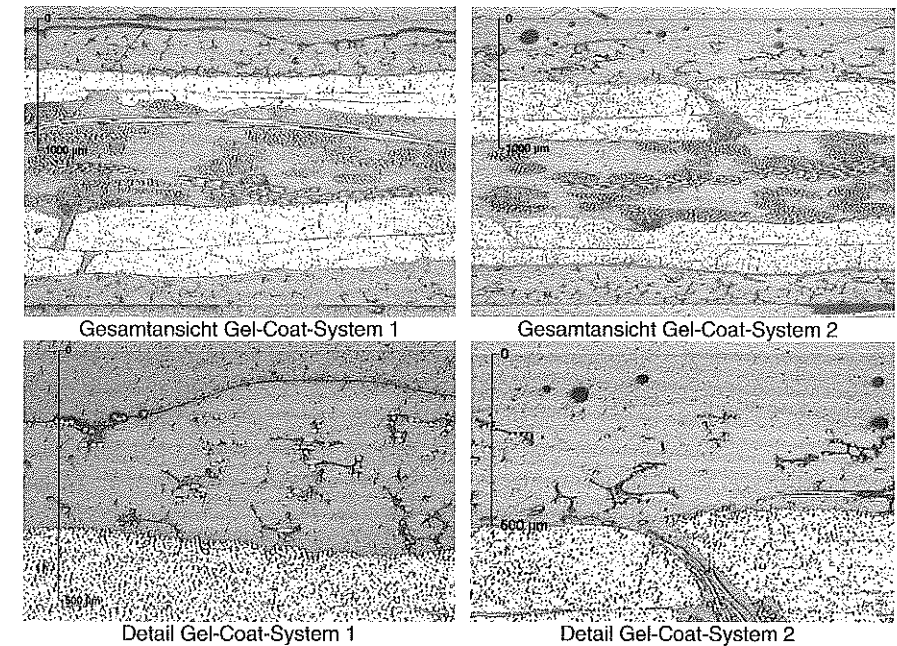


**Abbildung 7.7:** Laserprofilometer-Bilder und Linienscans von Gel-Coat-Oberflächen

In Abbildung 7.7 ist die starke körnige Eigenstruktur der Gel-Coats zu sehen, die durch die Applikation und die schnell einsetzende Reaktion bestimmt ist. Die Gel-Coat-Systeme sind für niedrigere Verarbeitungstemperaturen < 40 °C ausgelegt. Bei einer erhöhten Temperatur wie im vorliegenden Fall läuft die Vernetzungsreaktion so schnell ab, dass das Polyestersystem geliert bevor ein gleichmäßiger Film auf der Oberfläche gebildet werden kann. Daher werden die Spritzer oder „Fetzen“ sichtbar, in welchen der Gel-Coat grob durch die Spritzpistole auf die Oberfläche gesprüht wird. Wie unregelmäßig der Gel-Coat auf der Bauteiloberfläche aufgetragen ist, wird in Abbildung 7.8 ersichtlich. Die Schichtdicke der Gel-Coat-Schicht schwankt

erheblich zwischen ca. 70 und 200  $\mu\text{m}$  bei Gel-Coat-System 1 und zwischen 150 und 300  $\mu\text{m}$  bei System 2. Bei System 2 wird zudem ein weiteres Problem bei höheren Temperaturen sichtbar. Das im System befindliche Styrol verdampft aufgrund der hohen Temperatur und wird vor dem Ablüften bereits im gelierenden Material eingefangen, was zu zahlreichen Poren führt.

Gerade diese Eigenstruktur bewirkt jedoch, dass die Struktur der Verstärkungsfasern an der Oberfläche weniger deutlich sichtbar ist. Dieses Abdeckungsvermögen steigt mit zunehmender Schichtdicke. So ist bei beiden Gel-Coat-Systemen in Abbildung 7.7 die +45°-Richtung der darunter liegenden Faserverstärkung nicht mehr zu erkennen.



**Abbildung 7.8:** Schlißbilder von Musterteilen mit Gel-Coat-System 1 und -System 2

Um den Effekt der Schichtdicke auf die Oberflächenqualität zu ermitteln, wurden die Gel-Coat-Systeme in 3 verschiedenen Schichtdicken auf die Kavitätsfläche aufgetragen. Die starke Eigenstruktur, die mit zunehmender Schichtdicke immer stärker wird, spiegelt sich auch in den gemessenen Lang- und Kurzwelligkeitswerten wider (siehe Abbildung 7.9). Dabei wird der Grenzwert für lackierte horizontale Oberflächen von  $\text{LW} < 8$  von allen Gel-Coat-Variationen überschritten. Die Referenzoberfläche ohne Gel-Coat hat niedrigere gemessene Welligkeitswerte, aber dafür regelmäßige Störungen, die in einem +45°-Muster angeordnet sind.

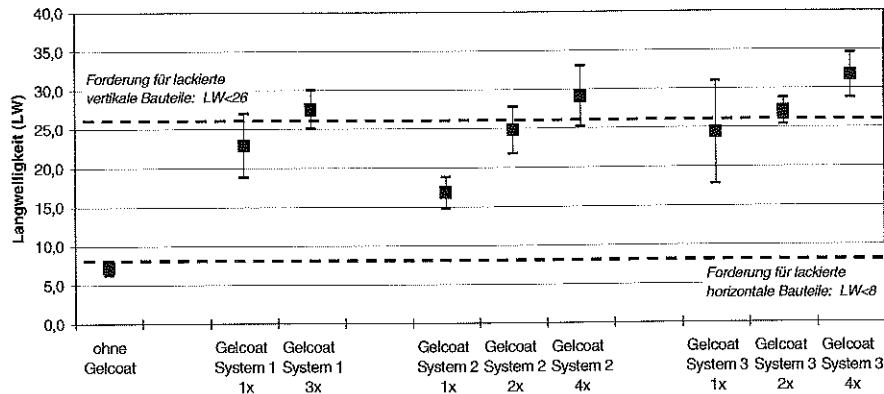


Abbildung 7.9: Langwelligkeitswerte verschiedener Gel-Coat-Oberflächen

Die hier untersuchten Gel-Coats können bei ausreichender Schichtdicke von mindestens 100 bis 150 µm die Abzeichnung der Faserverstärkung abdecken. Aufgrund der starken Eigenstruktur der Gel-Coats verursacht dies höhere Werte für die Lang- und Kurzwelligkeit der Oberfläche. Kleinere Schichtdicken führen bei allen drei Gel-Coat-Systemen zu geringerer Eigenstruktur und schwächerem Abdeckungsvermögen.

Die neue Störung durch die Gel-Coat-Struktur hat eine regellose Anordnung und ist mit einer gleichmäßig über das Bauteil verteilten Lackstruktur vergleichbar. Die Erfahrung zeigt, dass solche hohe Welligkeitswerte mit  $LW > 20$  durch eine anschließende Kunststofflackierung wieder gesenkt werden können (siehe Abbildung 7.18). Auch wenn dadurch die Oberflächenqualität für horizontale Außenhautbauteile mit  $LW < 8$  nicht erreicht werden kann, stellt diese Beschichtung eine Lösungsmöglichkeit für vertikale Bauteile mit dem Grenzwert von  $LW < 26$  dar. Insbesondere für Strukturbauteile mit horizontalen Flächen, wie der Seitenrahmen mit Schwellern, A-, B- und C-Säule im Einstiegsbereich oder tragende hintere Seitenwände, ist diese Technologie interessant. Für Strukturbauteile, die zum größten Teil im Nicht-Sichtbereich liegen, bietet die Gel-Coat-Technologie die Möglichkeit, das Werkzeug nur in bestimmten kritischen Bereichen vorzubeschichten und so Material und Zykluszeit einzusparen.

Für die Erschließung dieses Potenzials muss die Reaktivität der Gel-Coat-Systeme an die Verarbeitungstemperaturen angepasst werden, um eine gleichmäßige Filmbildung auf der heißen Werkzeugoberfläche zu ermöglichen und Porenbildung auszuschließen. Ferner ist die Auftragsmethode und die Viskosität hin zu einer gleichmäßigeren Verteilung durch eine feinere Zerstäubung zu optimieren. Erst nach einer Reduzierung der Gel-Coat-Eigenstruktur sind gute Ergebnisse aus den Lackierversuchen zu erwarten, welche die Anforderungen an vertikale Außenhautbereiche erfüllen.

### 7.1.3 EP-Surfacing-Film

Die Verwendung vorgefertigter matrixreicher Schichten an der Oberfläche von Bauteilen ist aus der Luft- und Raumfahrttechnik bekannt und in [47] und [23] beschrieben. Sogenannte „EP-Surfacing-Films“ werden zur Verbesserung der Oberflächenqualität von hochwertigen Bauteilen eingesetzt, die als Handlamine in Prepreg- und Autoklavtechnik hergestellt werden. Die Epoxidharzfilme sind auf einem leichten Vlies als Trägermaterial aufgetragen und haben typische Schichtdicken zwischen 125 und 380 µm. Zur Handhabung sind sie wie Prepregs auf der Rolle durch Zwischenfolien getrennt, um ein gegenseitiges Ankleben zu verhindern. Das Wirkungsprinzip der EP-Filme ist einfach: Durch die Erzeugung einer matrixreichen porenfreien Außenschicht soll die Oberflächenqualität der FVK-Bauteile angehoben werden. Dabei soll auch das Durchzeichnen der Verstärkungsfasern durch die gleichmäßige und von Fasern fast freie Oberflächenschicht vermindert oder sogar eliminiert werden.

Die Verwendung von EP-Surfacing-Films als matrixreiche Oberflächenschicht ist auch im RTM-Verfahren möglich. Für eine erste Umsetzung gilt es, die Verfahrensparameter im RTM-Prozess auf das Verarbeitungsfenster der EP-Filme anzupassen. Das Einbringen der Filme erfolgt im RTM-Verfahren ins bereits heiße Werkzeug im Gegensatz zum Handlaminieren auf eine noch kalte Form. Beim Aufheizen erfahren die EP-Filme eine Erweichung und Verflüssigung. Die Vernetzungsreaktion beginnt, was die Handhabung und Vorbereitung des EP-Films erschwert.

Um das Abdeckungsvermögen der Surfacing-Films zu untersuchen, wurden zwei Produkte verschiedener Hersteller im RTM-Verfahren im Versuchswerkzeug verarbeitet. Die Werkzeugtemperatur lag bei 120°C, um eine Vernetzung des EP-Films zu ermöglichen. Für beide Filme wurde eine geringe Dicke von 125 µm gewählt. Die resultierenden Oberflächenstrukturen sind unterschiedlich, wie in Abbildung 7.10 ersichtlich ist.

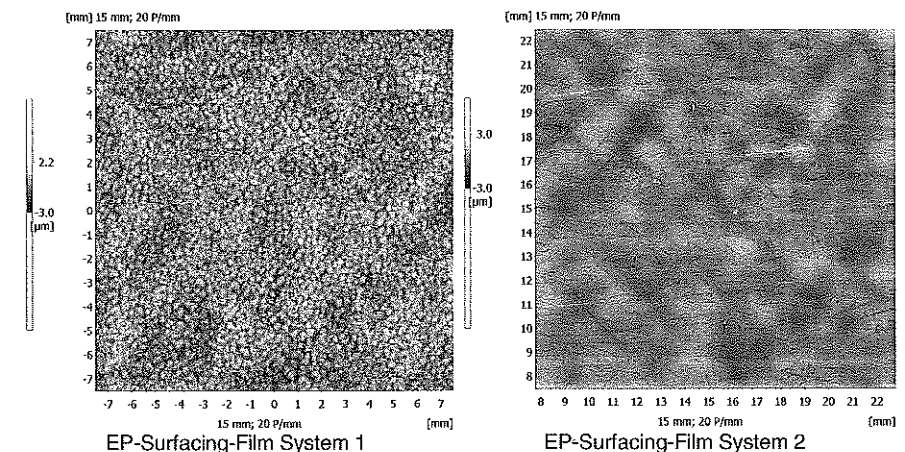


Abbildung 7.10: Laserprofilometer-Bilder von Musterplatten mit EP-Surfacing-Films

System 1 hat eine starke körnige Eigenstruktur und deckt die Faserabzeichnung in  $+45^\circ$ -Richtung soweit ab, dass sie nur noch schwach zu erkennen ist. Die Oberfläche von System 2 zeigt Abzeichnungen des Trägervlieses im EP-Film sowie ein stärkeres Durchzeichnen der Faserverstärkung. Das Abdeckungsvermögen von System 2 ist geringer als jenes von System 1. In Abbildung 7.11 sind Schliffbilder zu den beiden EP-Filmen gezeigt.

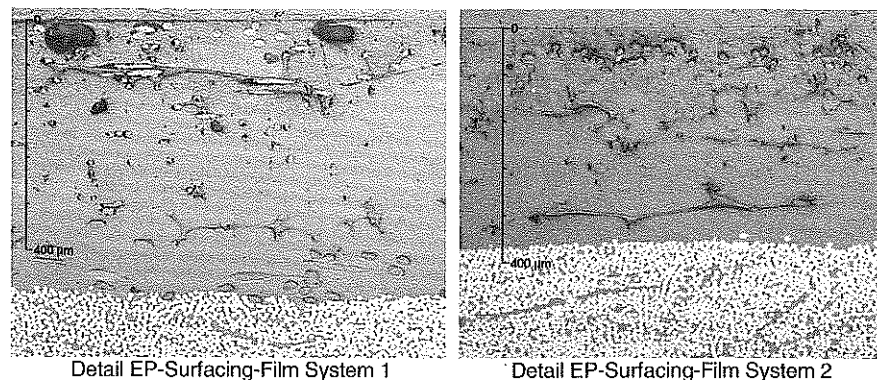


Abbildung 7.11: Mikroskopie-Schliffbilder von EP-Surfacing-Films

Bei beiden EP-Surfacing-Films ist im Schliffbild die Trennfläche zwischen Film und Bauteil kaum zu erkennen. Dies liegt zum einen am ähnlichen Material, da die Filme ebenfalls aus Epoxidharz bestehen. Zum anderen kann der EP-Film bis auf die Vorreaktion beim Einlegen ins Werkzeug zusammen mit dem injizierten EP-Material reagieren, was eine stoffliche Einheit des Films mit dem Bauteil bewirkt. Bei System 1 ist eine starke Porigkeit im Film vorhanden, welche durch die Schwierigkeiten beim Einlegen des Films bedingt ist. Die Trägervliese sind in beiden Systemen zu erkennen und bestehen aus Glasfasern. Bei einer starken Vergrößerung werden im System 2 zudem Feststoffpartikel mit Kantenlängen von 10 bis 40  $\mu\text{m}$  sichtbar.

In Abbildung 7.12 ist die Langwelligkeit für verschiedene Musterbauteile mit EP-Surfacing-Films angegeben. Da die Verarbeitungstemperatur bei ca. 120  $^\circ\text{C}$  liegt, sind auch die Welligkeitswerte des Referenzbauteils ohne Beschichtung höher als gewohnt. Es zeigt sich, dass die EP-Filme die Lang- und Kurzwelligkeit vermindern können. EP-Film-System 1 verringert die Welligkeitswerte in stärkerem Maße als System 2. Die Wartezeit nach dem Einlegen des Films hat einen Einfluss auf die Verbesserung der Oberflächenqualität. Bei sehr langem Warten härtet der EP-Film im Werkzeug ohne Druck bereits so weit aus, dass die Werkzeugoberfläche nicht exakt abgebildet wird.

Das Abdeckungsvermögen der EP-Surfacing-Films ist also im RTM-Verfahren nutzbar. Durch die hohen Verarbeitungstemperaturen, die zu einer Aushärtung der EP-Filme benötigt werden, entsteht eine hohe Verarbeitungsschwindigkeit mit starken Faserabzeichnungen. Das Abdeckungsvermögen der EP-Filme reicht noch nicht aus, um diese starken Strukturen komplett

abzudecken. Zudem darf sich die körnige Eigenstruktur von System 1 bei einer nachfolgenden Lackierung nicht nachteilig auswirken. Ebenso wie bei den Gel-Coats bietet sich hier eine Lösung für Strukturbauteile mit vertikalen Außenhautbereichen an. Die Eigenstruktur kann bereits am unlackierten RTM-Teil weit unter dem geforderten Grenzwert von  $\text{LW} < 26$  liegen.

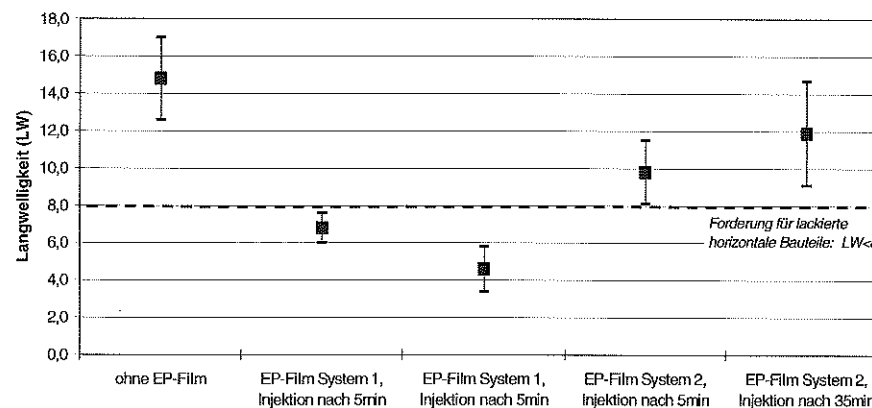


Abbildung 7.12: Langwelligkeit für RTM-Musterteile mit EP-Surfacing-Films

Auch wenn die EP-Surfacing-Films Potenzial zur Abdeckung der Faserabzeichnung bieten, bedeuten sie einen hohen Aufwand durch die schwierigen Randbedingungen und notwendigen Veränderungen im RTM-Prozess. Die EP-Filme müssen für eine serientaugliche Fertigung vorher umgeformt werden, damit sie in dreidimensionale Werkzeuge in einem Arbeitsschritt eingelegt werden können. Dies kann zusammen mit der Umformung der Faserhalbzeuge im Preformprozess stattfinden. Dabei ist die vorzeitige Reaktion des EP-Films zu vermeiden, damit die Bauteiloberfläche erst im hochwertigen RTM-Werkzeug ausgebildet wird. Für eine hohe Oberflächenqualität des Bauteils sind niedrigere Werkzeugtemperaturen im RTM-Verfahren mit den hier untersuchten Epoxidharzsystemen eine Abstimmung der Filme auf Temperaturen zwischen 60 und 90  $^\circ\text{C}$  notwendig.

#### 7.1.4 Inmould-Powder-Coating

Der Gel-Coat-Technologie sehr ähnlich sind die Inmould-Powder-Coatings (IPC), die vor dem RTM-Prozess in das offene Werkzeug eingesprüht werden (siehe auch [22]). Es handelt sich hierbei um ein pulverförmiges Polymergemisch, das unter Temperatureinfluss schmilzt, einen flüssigen Film bildet und aushärtet. Da diese Pulverschichten im Grunde Pulverlacke sind, erfolgt die Applikation mittels elektrostatischer Pulversprühanlagen, die bereits im industriellen Maßstab für zahlreiche Beschichtungsanwendungen genutzt werden. Die verwendeten Pulver bestehen aus Polyester mit Zusätzen wie Verlaufsmittel, Pigmente und Füllstoffe. Im Vergleich zu Gel-Coats sind gleichmäßigere und dünnere Schichten mit Dicken von 100 bis 200  $\mu\text{m}$

möglich. Zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften und besonderer optischer Gestaltung werden die Inmould-Powder-Coatings bereits in der SMC-Herstellung eingesetzt, insbesondere im Sanitärbereich. Die automatisierte Applikation ins offene Werkzeug mit Sprührobotern und Absaugvorrichtung ist bereits Stand der Technik. Durch die sehr kurze Reaktionszeit des Pulvers auf den heißen Werkzeugen wird die Taktzeit nur um die Applikationszeit für das Pulver verlängert. Je nach Komplexität und Größe des Bauteils kann dies in 10 bis 30 Sekunden erfolgen.

Um diese Beschichtungsart hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenqualität zu untersuchen, wurden im Labormaßstab RTM-Versuche mit einem Inmould-Powder-Coating durchgeführt. Dazu kam eine elektrostatische Pulversprühanlage mit Handpistole zum Einsatz, die für Laboranwendungen geeignet ist. Durch diese Applikationstechnik kann das Pulver zunächst über die elektrostatische Aufladung sehr fein zerstäubt werden. Durch den elektrostatischen Effekt haftet es gleichmäßig verteilt an der geerdeten leitfähigen Werkzeugoberfläche. Eine einseitig offene Absaugvorrichtung über dem Werkzeug führt überschüssiges Pulver ab. Mit dem Hersteller der IPC-Beschichtungen wurde ein System mit passendem Verarbeitungsfenster ausgesucht. Während in der SMC-Verarbeitung Temperaturen um 150 °C üblich sind, kann dieses System bereits ab einer Werkzeugtemperatur von 115 °C eingesetzt werden. Das System verflüssigt sich sofort bei Kontakt mit der heißen Werkzeugoberfläche und reagiert dort innerhalb von Sekunden zu einem festen Film. Da die chemische Reaktion der Beschichtung vom Luftsauerstoff unterbunden wird, bleibt die der Kavität zugewandte Seite noch flüssig. Diese Eigenschaft ist für eine gute Verbindung zwischen dem Bauteil und der IPC-Schicht von Vorteil, da sich die Materialien durchdringen und gemeinsam aushärten können.

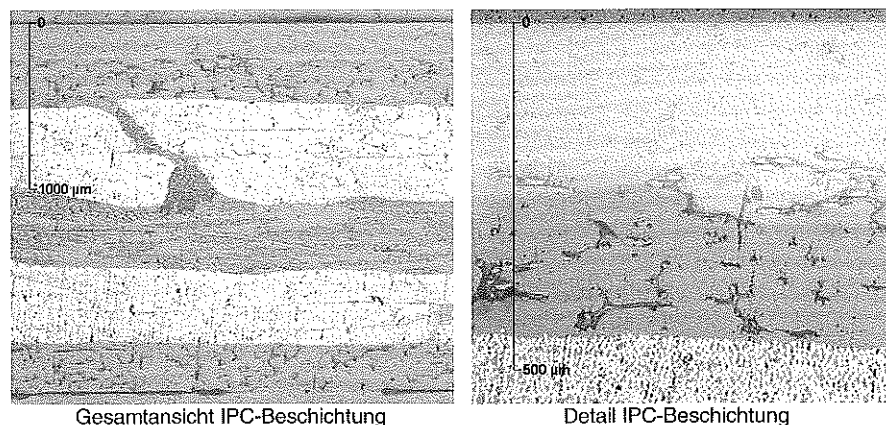


Abbildung 7.13: Schliffbilder von Musterbauteilen mit IPC

In Abbildung 7.13 sind beispielhaft zwei Schliffbilder von IPC-beschichteten Proben gezeigt. Die verschwommene Grenze zwischen Bauteil und Beschichtung zeigt, dass der IPC-Film zum Zeitpunkt der Harzinjektion ins Werkzeug auf der Kavitätsseite noch flüssig ist. Die hier gezeigte

IPC-Beschichtung ist ca. 200 µm dick. Die Auswirkungen einer IPC-Beschichtung an der Bauteiloberfläche werden in Abbildung 7.14 sichtbar.

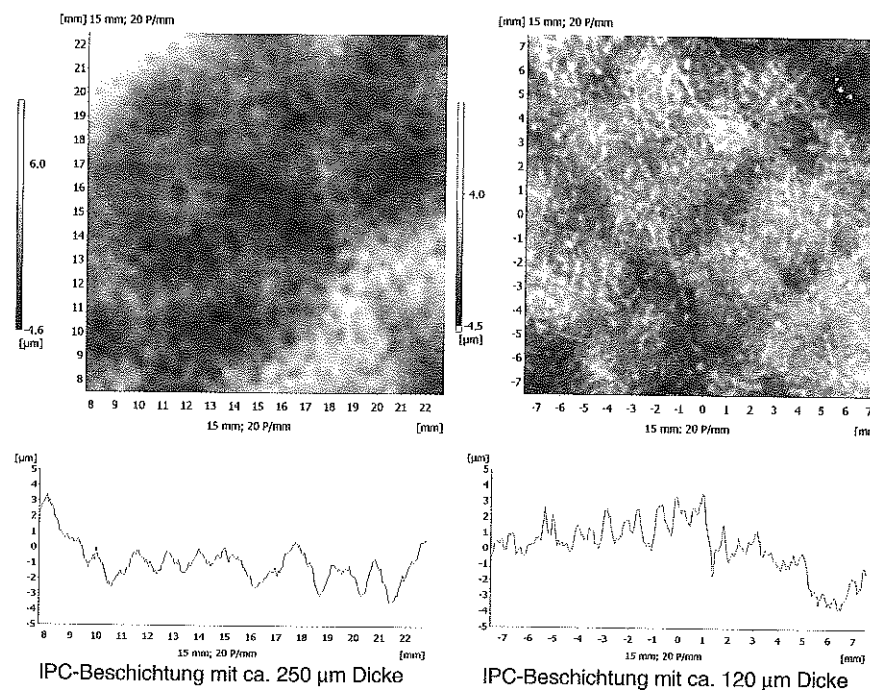


Abbildung 7.14: Laserprofilometer-Bilder von IPC-beschichteten Oberflächen

Grundvoraussetzung für eine hohe Oberflächenqualität ist eine geringe Korngröße und hohe Qualität des Pulvers für eine gleichmäßige und störungsfreie Applikation. Weiterhin muss die Injektion innerhalb möglichst kurzer Zeit nach dem Aufsprühen des IPC erfolgen, damit die Aushärtung im heißen Werkzeug nicht zu weit drucklos fortschreitet. Während die Eigenstruktur und die Welligkeit der IPC-Beschichtung mit größerer Dicke zunimmt, steigt auch das Abdeckungsvermögen. In Abbildung 7.14 ist der Unterschied zwischen zwei verschiedenen dicken IPC-Schichten zu erkennen. Bei geringerer Dicke ist die Faserabzeichnung in  $\pm 45^\circ$ -Richtung stärker. Zudem tritt hier die Faserstruktur der obersten Vlieslage hervor, was beim Einlegen auf den teilweise flüssigen IPC-Film verursacht wird. Bei größeren Schichtdicken von ca. 250 µm bildet der Film eine Art Orangenhaut auf der Oberfläche mit einer typischen, regellos verteilten, welligen Struktur, welche auch im Linienscan von Abbildung 7.14 erkennbar ist.

Auch die Beschichtung mit Inmould-Powder-Coating bietet nicht das notwendige Abdeckungsvermögen zum vollständigen Eliminieren des Faserdurchzeichnens. Aufgrund der notwendigen hohen Verarbeitungstemperaturen stellt sich ein ähnliches Problem wie bei den EP-Surfacing-Films. Die stärkere Faserdurchzeichnen bei höheren Temperaturen kann durch die Applikation

der zusätzlichen Schicht nicht kompensiert werden. Daher kommt es trotz großer Schichtdicken für dieses Verfahren von 250 µm zur Abzeichnung der darunter liegenden Verstärkungshalbzeuge.

Um eine wirkungsvolle Verbesserung der Oberflächenqualität im RTM-Verfahren mit Inmould-Powder-Coatings zu erreichen, müssen einige Abstimmungen erfolgen. Zunächst sind IPC-Systeme mit niedrigen Verarbeitungstemperaturen zwingend notwendig, um geringe Welligkeitswerte des unbeschichteten Bauteils zu erhalten. Ferner muss das Verlaufsverhalten des flüssigen IPC-Films beim Gellieren und Anhärten so angepasst werden, dass die körnige Eigenstruktur geringer und die Oberfläche glatter wird. Ähnlich wie bei den Gel-Coats und den EP-Filmen bietet sich nach einer solchen werkstofflichen Weiterentwicklung ein Potenzial für vertikale Außenhautbereiche.

### 7.1.5 In-Mould-Coating

Das In-Mould-Coating (IMC) zählt für Außenhautbauteile aus SMC bereits zum industriellen Standard. Die IMC-Technologie für das SMC-Verfahren ist unter anderem in [3], [21] und [85] beschrieben, eine Übertragung auf das Organoblechumformen in [9]. Das IMC wird im Gegensatz zu den Gel-Coats nach der eigentlichen Bauteilherstellung im Werkzeug auf die Bauteiloberfläche appliziert. Nach der Aushärtung des SMC-Bauteils wird das Werkzeug um eine definierte Höhe geöffnet und die IMC-Beschichtung flüssig in den entstehenden Spalt zwischen Werkzeug- und Bauteiloberfläche eingespritzt. Die Beschichtung härtet im heißen Werkzeug aus und bildet die Kavitätsoberfläche exakt ab. Diese Technologie hat den Vorteil, dass die IMC-Schicht den Reaktionsschumpf des Matrixmaterials des Bauteils nicht mehr erfährt. Da dieser bereits bei der Bauteilherstellung stattgefunden hat, kann er komplett durch die IMC-Beschichtung ausgeglichen werden.

Für den Einsatz von In-Mould-Coatings ist eine aufwendige Anlagentechnik notwendig. Dazu zählen eine präzise Öffnung des Werkzeugs, die geforderte Dichtigkeit des Werkzeugs, ein Misch- und Dosieraggregat und ein Injektionskopf für das IMC-Material. Die Technologie ist mit entsprechendem anlagentechnischen Aufwand auf das RTM-Verfahren übertragbar. Da die Beschichtung im geschlossenen Werkzeug erfolgt, ergeben sich Vorteile für die Arbeitssicherheit, die Umweltbelastungen und die Qualitätssicherung. Die Auswirkungen der Reaktionschwindung können durch die IMC-Schicht abgedeckt werden, während das Faserabzeichnen aufgrund der thermischen Schwindung nach der Beschichtung stattfindet.

### 7.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die thermoplastischen Folien, hier erstmalig im RTM-Verfahren eingesetzt, zeigten eine Reduzierung der Faserabzeichnungen in Abhängigkeit von Folienmaterial und -dicke. Die besten Ergebnisse in Bezug auf Abdeckungsvermögen und Folienrauheit wurden mit der PA6.6-Folie mit 100 µm Dicke erreicht (siehe Abbildung 7.6). Zusätzliches Potenzial bietet sich zur Ab-

deckung von Porosität, falls diese im Serien-RTM-Prozess nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, und beim Einsatz von Lackträgerfolien.

Die Verwendung von Gel-Coats ist im RTM-Verfahren bereits Stand der Technik, wenn auch unter anderen Rahmenbedingungen. Die am Markt befindlichen Systeme sind nicht für die hohen Temperaturen und kurzen Zykluszeiten des hier betrachteten RTM-Prozesses geeignet. Die durchgeführten Versuche zeigten ein hohes Abdeckungsvermögen der Gel-Coats ab Schichtstärken von ca. 150 µm. Die unregelmäßige Eigenstruktur der Gel-Coats bewirkte eine starke Langwelligkeit, die erfahrungsgemäß teilweise durch die Kunststofflackierung ausgeglichen werden kann (siehe Abbildung 7.7 links). Dies stellt ein großes Potenzial für den Einsatz in vertikalen Außenhautbereichen mit einem Grenzwert für die lackierte Oberfläche von  $LW < 26$  dar.

Ein ähnliches Verhalten zeigten die EP-Surfacing-Films, die hier erstmalig im RTM-Verfahren als Oberflächenschicht verarbeitet wurden. Auch hier bewirkte die Eigenstruktur bei ausreichender Dicke eine Abdeckung der Faserabzeichnung (siehe Abbildung 7.10 links und Abbildung 7.12), wobei Schwierigkeiten bei der Applikation und Abstimmung der EP-Filme auftraten.

Das Inmould-Powder-Coating stellt eine für das RTM-Verfahren neuartige Beschichtung dar, die ähnlich den Gel-Coats ins offene RTM-Werkzeug eingebracht wird. Für die hier notwendigen Werkzeugtemperaturen wurden die Faserstrukturen bei Schichtdicken von 250 µm fast abgedeckt (siehe Abbildung 7.14 links). Das Potenzial zur Oberflächenverbesserung lässt sich erst dann erschließen, wenn die verwendeten Pulver auf niedrigere Aushärtetemperaturen abgestimmt werden können.

Von den untersuchten Prozessbeschichtungen bieten die thermoplastischen Folien und die Gel-Coats kurzfristig das größte Potenzial zu Abdeckung der Faserabzeichnung und weiterer Oberflächendefekte bei vertretbarem Entwicklungsaufwand. Diese beiden Beschichtungsmethoden zeigten auch bei geringen Schichtdicken von 100 bis 150 µm die Fähigkeit, die Abzeichnung der Verstärkungsstrukturen an der Oberfläche zu verringern oder sogar ganz zu überdecken. Sowohl die EP-Surfacing-Films als auch das Inmould-Powder-Coating bedeuten für eine weitere Entwicklung zunächst einen höheren Aufwand in der Anpassung der Materialien und der Applikationstechnik an das vorliegende RTM-Verfahren. Zudem ist das Abdeckungsvermögen geringer, was für einen wirksamen Einsatz von IPC zu größeren Schichtdicken von über 250 µm führt.

## 7.2 Nachträgliche Deckschichten

Bei nachträglichen Deckschichten handelt es sich um polymere Systeme, die flüssig auf die Bauteiloberfläche aufgetragen werden, dort einen flüssigen Film und schließlich durch Aushärtung eine feste Oberflächenschicht bilden. Der Verlauf der aufgetragenen flüssigen Schicht, das Verhalten bei der Aushärtung und die Verarbeitungstemperatur bestimmen das Abdeckungs-

vermögen. In Abbildung 7.15 ist der Effekt bei der Verwendung von nachträglichen Deckschichten schematisch dargestellt.

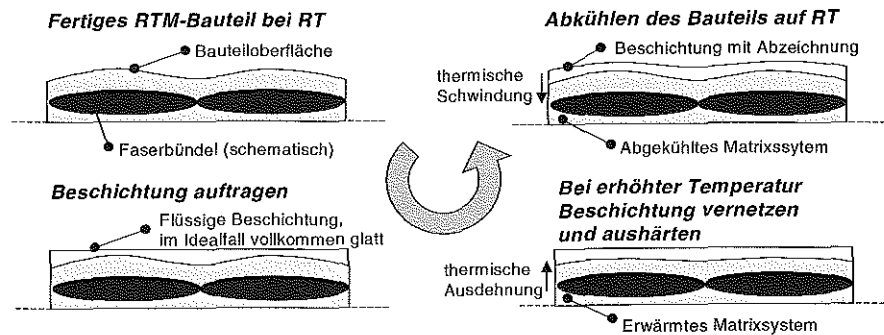


Abbildung 7.15: Abzeichnung von Oberflächenstrukturen bei nachträglichen Deckschichten

Ausgangspunkt für die Beschichtung ist das fertige RTM-Bauteil mit den Faserabzeichnungen an der Oberfläche. Die Zwischenschicht kann bei RT oder einer erhöhten Temperatur flüssig aufs Bauteil aufgetragen werden. Die Gestalt des flüssigen Films wird durch die Eigenschaften der Beschichtung und des Substrats bestimmt. Das Verlaufsverhalten der Beschichtung ergibt sich u.a. aus Benetzungsverhalten, Oberflächenspannung, Viskosität und Feststoffgehalt. Störungen mit sehr kleiner flächiger Ausdehnung im Bereich der Kurzwelligkeit oder Rauheit können leichter bedeckt und ausgeglichen werden als Störungen mit großer Wellenlänge. Zu letzteren zählt das Faserdurchzeichnen mit Wellenlängen von 500-1500  $\mu\text{m}$  und Amplituden von 1-4  $\mu\text{m}$ . Im Idealfall gleicht die Beschichtung im flüssigen Zustand die Oberflächenstörungen des Substrats durch ihr optimiertes Verlaufsverhalten aus. Zur Aushärtung oder Trocknung der Beschichtung wird das Bauteil erwärmt. Durch die thermische Ausdehnung des Matrixsystems werden die Faserabzeichnungen schwächer. Beim Übergang des Beschichtungsmaterials vom flüssigen in den festen Zustand kann die Oberfläche im Idealfall vollkommen glatt sein. Bei der Abkühlung auf RT wird die Faserabzeichnung des RTM-Bauteils aufgrund der thermischen Volumenschwindung stärker. Dieser Anteil von der Übergangstemperatur der Beschichtung bis zur Gebrauchstemperatur des Bauteils kann so grundsätzlich nicht abgedeckt werden.

### 7.2.1 Lackieren von Kunststoffen

In der Automobilindustrie erfüllt die Lackierung von Außenhautbauteilen Anforderungen an die Ästhetik und an den Schutz der Bauteile vor Außeneinwirkungen. Diese dekorative und protektive Funktion wird auf hohem Niveau und mit sehr hohem Aufwand auf der Material- und Verfahrensebene in der Lacktechnologie der Automobilhersteller verwirklicht. Dabei ist der am meisten verbreitete Grundwerkstoff für eine Außenhautlackierung Stahl, in zunehmendem Maße auch Aluminium. Kunststoffe haben in Großserien hauptsächlich in Form von thermoplastischen Anbauteilen (z.B. Stoßfänger und Schweller) Einzug gehalten. Aber auch für

duroplastische Werkstoffe werden Kunststofflackierungen entwickelt, z.B. für SMC- oder RTM-Bauteile aus glasfaserverstärkten Polyesterharzen. Die vorwiegenden Gründe für eine Lackierung im Gegensatz zu einer Einfärbung der Kunststoffe sind in Tabelle 7.2 angegeben. Die nachträglich applizierte Lackschicht hat neben der Abdeckung von Fließlinien, Poren oder Lunkern auch einen Einfluss auf das Durchzeichnen regelmäßiger Verstärkungsstrukturen.

Tabelle 7.2: Gründe für die Lackierung von Kunststoffen [58]

Genauere Reproduzierbarkeit des Farbtones	Mehrfarbige Gestaltung
Einhaltung vorgeschriebener Glanzgrade	Ausbessern von Beschädigungen
Metallic-Effekt	Erhöhung der Kratzfestigkeit
Verdecken von Fließlinien	Verbesserung der Chemikalienbeständigkeit
Beseitigen von Poren oder kleinen Lunkern	Verstärkter Schutz gegen Verwitterung

Da das Themengebiet der Lackierungen allgemein sehr umfassend und komplex ist, sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen, z.B. [127], [71] und [125]. Das Thema Kunststofflackierungen, insbesondere im Automobilbau, wird in [49], [58], [74], [96], [73] und [124] behandelt.

Zur Kunststofflackierung werden Lackfarben oder unpigmentierte Lacke, also Klarlacke und Transparentlacke, eingesetzt. Bei der Lackierung in Wagenfarbe, wie im vorliegenden Fall untersucht, setzen sich die Lacke aus den in Abbildung 7.16 gezeigten Komponenten oder Anteilen davon zusammen. Die hier betrachteten Lacksysteme haben alle einen flüssigen Verarbeitungszustand.

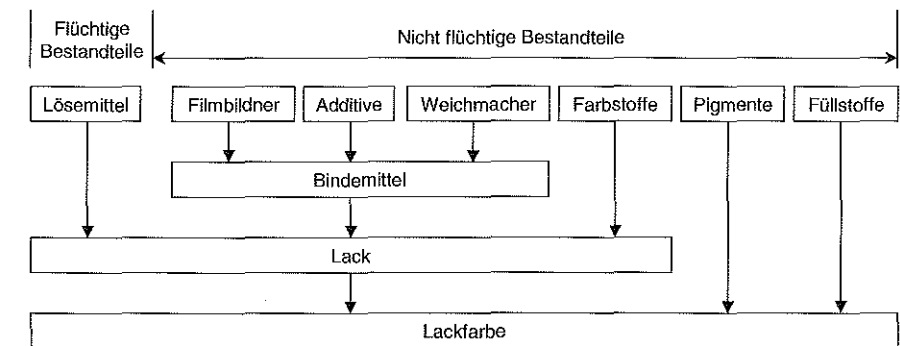


Abbildung 7.16: Komponenten einer Lackfarbe, nach [127]

Unter der Filmbildung wird der Übergang des Lackes aus der flüssigen Applikationsform in den festen, zusammenhängenden Überzug verstanden. Dieser feste Film entsteht durch eine Polymerisation der niedermolekularen Ausgangsstoffe des Filmbildners zu Makromolekülen. Die Lösemittel haben bei Lacksystemen die Aufgabe, das Bindemittel ohne chemische Umsetzung zu lösen und eine günstige Viskosität für die Verarbeitung einzustellen. Die Lösemittel, ob orga-

nische Lösemittel oder bei den wasserbasierten Lacksystemen hauptsächlich Wasser, verdunsten oder verdampfen in einem Vorgang, der als physikalische Trocknung bezeichnet wird. Eine chemische Trocknung oder Härtung des Lacksystems bedeutet, dass der feste Überzug durch die chemische Reaktion des polymeren Filmbildners entsteht. In der Praxis führen häufig beide Trocknungsarten, zunächst das Verdampfen von Lösemittel und eine gleichzeitige oder anschließende Vernetzungsreaktion, zur Filmbildung. Weichmacher sollen im Gegensatz zu den Lösemitteln im Film verbleiben und dort die Beweglichkeit der Molekülketten erhöhen. Dies führt zu einer Verminderung von Glasübergangstemperatur, Sprödigkeit, Reißfestigkeit und Bruchdehnung. Farbstoffe sind lösliche Farbmittel, während Pigmente und Füllstoffe unlösliche Feststoffe sind. Sie geben der Lackfarbe ihr Deckvermögen und ihre Farbe.

Neben den zahlreichen verschiedenen Löse- und Bindemitteln gibt es eine noch größere Zahl von Additiven oder Lackzusätzen, die zahlreiche Eigenschaften der Lackfarben beeinflussen. Dazu zählen z.B. Härtungsbeschleuniger, Hautverhinderungs-, Benetzungs-, Antilabsetz- und Verlaufmittel.

### 7.2.1.1 Lackaufbau für Kunststofflackierungen

Üblicherweise werden automobiler Außenhautbauteile aus Kunststoff im Dreischichtverfahren in Wagenfarbe lackiert. Dieser Standard-Lackaufbau ist in Abbildung 7.17 mit typischen Schichtdicken gezeigt. Die Gesamtschichtdicke bei einer solchen konventionellen Kunststofflackierung bewegt sich meist zwischen 70 und 120  $\mu\text{m}$ .

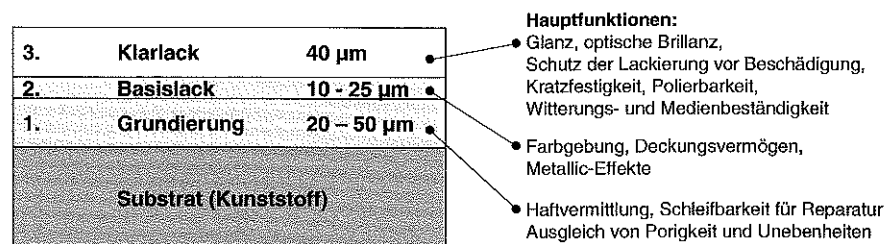


Abbildung 7.17: Lackaufbau bei einer konventionellen Kunststofflackierung

Zunächst erfolgt der Auftrag einer Funktionsbeschichtung direkt auf das Substrat. Diese Grundierung übernimmt wichtige Funktionen im Lackaufbau, wie die Haftvermittlung zwischen Substrat und Decklack, die leichte Reparatur durch Schleifbarkeit und die Glättung der Oberfläche von problematischen Substraten. Je nach Funktion spricht man von Haftvermittlern, Füllern oder Primern. Beim Ausgleich oder Abdecken von Porigkeit und Oberflächenstrukturen kommen Füller zum Einsatz, die durch besonderes, optimiertes Verlaufsverhalten eine glatte, störungsfreie Oberfläche für die nachfolgende Decklackierung erzeugen sollen.

Auf die Grundierung erfolgt der Auftrag des Basislacks, der mit sehr geringer Schichtdicke den Farbton erzeugt. Abschließend wird in einer oder mehreren Schichten der Klarlack appliziert, welcher die Tiefenwirkung, die optische Brillanz und den Glanzgrad des Lackaufbaus bestimmt. Der Klarlack ist neben seiner ästhetischen Funktion auch für den Schutz des Lacksystems vor äußeren Einflüssen, wie mechanische Belastungen, Bewitterung und aggressive Medien, verantwortlich. Somit werden hier besonders hohe Ansprüche an die Kratz- und Schlagfestigkeit sowie an die UV-Beständigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Salzwasser, Waschmitteln und Treibstoffen gestellt.

In der Automobilindustrie befinden sich zahlreiche Lacksysteme zur Kunststofflackierung von verschiedenen Lackherstellern im Serieneinsatz. Neben den zahlreichen funktionalen Anforderungen erfüllen diese Lacksysteme auch die Anforderungen an die Oberflächenqualität. Dabei sind die Systeme auf das in Wagenfarbe zu lackierende Substrat abgestimmt, in diesem Falle thermoplastische Kunststoffe ohne Faserverstärkung. Eine direkte Übertragung dieser Lacksysteme auf duroplastische Substrate stellt nur den Anfang einer Entwicklung dar. Obwohl einige Anforderungen an die Lackierung wie Oberflächenqualität und -funktionen weitgehend gleich sind, liegen von der Substratseite her andere Anforderungen und Randbedingungen vor. So sind bei faserverstärkten Duroplasten sowohl die Haftungs- und Benetzungseigenschaften als auch die Struktur der Oberfläche vollkommen verschieden von den Oberflächeneigenschaften der unverstärkten Thermoplaste.

Um die tatsächlich erreichbare Oberflächenqualität von Außenhaut-Bauteilen aus faserverstärkten Duroplasten ermitteln zu können, muss eine Abstimmung der Lacksysteme auf diese neuartigen Substrate erfolgen. Eine entscheidende Rolle wird dabei die Grundierungsschicht zwischen Substrat und Decklackierung aus Basis- und Klarlack einnehmen. Während die nach außen gewandten Funktionen des Lacksystems entscheidend vom Decklack geprägt sind, bildet diese Zwischenschicht die Schnittstelle zu einem einzigartigen Substrat mit speziellen Anforderungen an Haftung, Verlaufsverhalten und Abdeckungsvermögen.

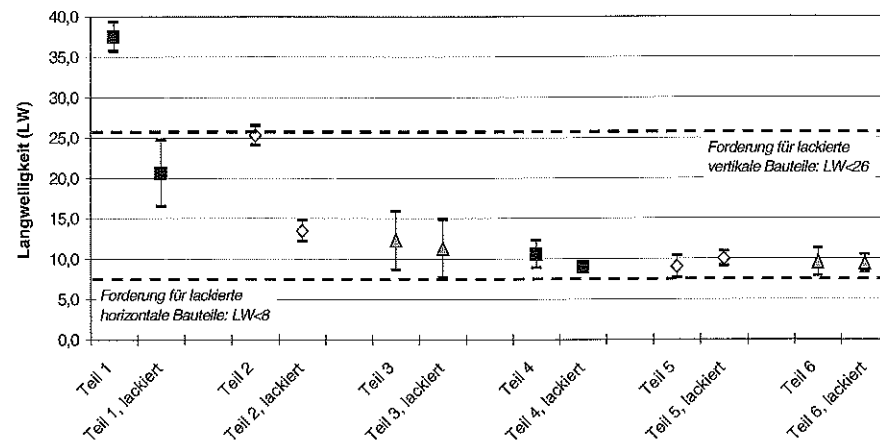
### 7.2.1.2 Einfluss der Lackierung auf die Oberflächenqualität

Selbst bei glattem Untergrund zeigen Lackierungen eine Eigenstruktur, die bei der Applikation und während der Filmbildung aufgrund verschiedener Mechanismen entsteht. Entscheidend ist dabei die bei der Polyreaktion auftretende Schwindung. Der langwellige Anteil dieser lackspezifischen Eigenstruktur wird auch als „Orangenhaut“ bezeichnet. Sowohl die Zusammensetzung der Beschichtung aus den zahlreichen Komponenten als auch die Applikationstechnik und Lacktrocknung haben Einfluss auf die entstehende Eigenstruktur (siehe [46] und [97]). Während die Kurzwelligkeit hauptsächlich vom Lackmaterial und kaum von der Applikationsmethode bestimmt wird, beeinflussen neben den eingesetzten Grundmaterialien und Zusatzstoffen im Lack auch Einbrennlage und Schichtdicke die Langwelligkeit.

Wichtig für die Betrachtung von Ergebnissen von Lackierversuchen ist also auch die Beachtung einer abgestimmten Applikationstechnik. Zudem können bei Lackierung von Hand, wie für

Musterteile in geringer Teilezahl üblich, Schwankungen sowohl zwischen Einzelteilen als auch zwischen Chargen auftreten. Bei Lackierung durch verschiedene Personen und an unterschiedlichen Tagen ist die Reproduzierbarkeit von Schichtdicken, Ablüft- und Aushärtezeiten problematisch. Somit kann es zu Schwankungen der Schichtdicken, des Verlaufsverhalten und der Eigenstruktur des Lacksystems selbst kommen, was die Untersuchungen der eigentlichen Substratqualität erschwert.

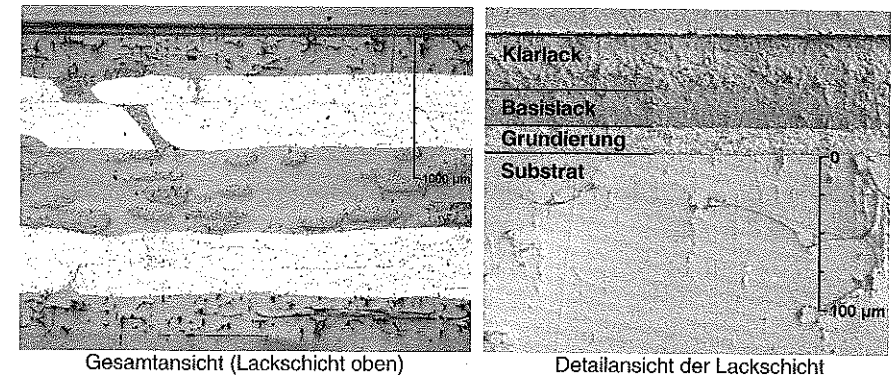
Auch die Beschichtung der hier untersuchten Musterteile aus CFK mit einer konventionellen Kunststofflackierung führt zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur. In Abbildung 7.18 sind die Werte für die Langwelligkeit vor und nach der Lackierung für unterschiedliche Musterbauteile angegeben. Diese CFK-Musterteile wurden alle mit dem Standard-Lagenaufbau, dem gleichen verwirkten Multiaxialgelege, gleichen Textilglasmatte mit Endlosfasern und dem Harzsystem A1 produziert. Da aber verschiedene Oberflächenvliese zum Einsatz kamen und die Bauteile bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen von 80 bis 110 °C hergestellt wurden, sind die Welligkeitswerte der unlackierten CFK-Bauteile sehr verschieden. Dabei fällt auf, dass die Lackierung bei unlackierten Oberflächen mit starken Strukturen und hohen Langwelligkeitswerten eine Verminderung der Langwelligkeit bewirkt. Hier erfolgt eine Einebnung oder Abdeckung der Oberflächenstrukturen. Für unlackierte Oberflächen mit niedrigen LW-Werten im Bereich von 8 bis 12 verändert die Lackierung die Langwelligkeit kaum. Für die hier nicht dargestellte Kurzwelligkeit stellt sich ein ähnliches Bild ein. Bei vorher hohen SW-Werten verringert eine Lackierung die Kurzwelligkeit erheblich. Sind die SW-Werte am unlackierten Teil < 15, so erhöht sich die Kurzwelligkeit durch die Lackierung aufgrund der Eigenstruktur des Lacksystems.



**Abbildung 7.18:** Langwelligkeitswerte vor und nach der Lackierung von CFK-Musterbauteilen

Zur Darstellung der Größenverhältnisse sind in Abbildung 7.19 Schliffbilder eines CFK-Musterbauteils mit 2 mm Dicke gezeigt, welches konventionell im Dreischichtverfahren lackiert wurde. In

der Detailansicht der Lackschicht sind die drei Schichten Grundierung, Basislack und Klarlack zu erkennen. Der Einfluss der Lackierung auf die Oberflächenqualität ist bei allen Substraten gegeben. Eine Kunststofflackierung kann insbesondere bei starken Strukturen der unlackierten Oberfläche Effekte wie Einebnung und Ausgleich bewirken. Jede Lackierung hat eine Eigenstruktur, die das Erscheinungsbild der lackierten Oberflächen ebenfalls stark beeinflusst.

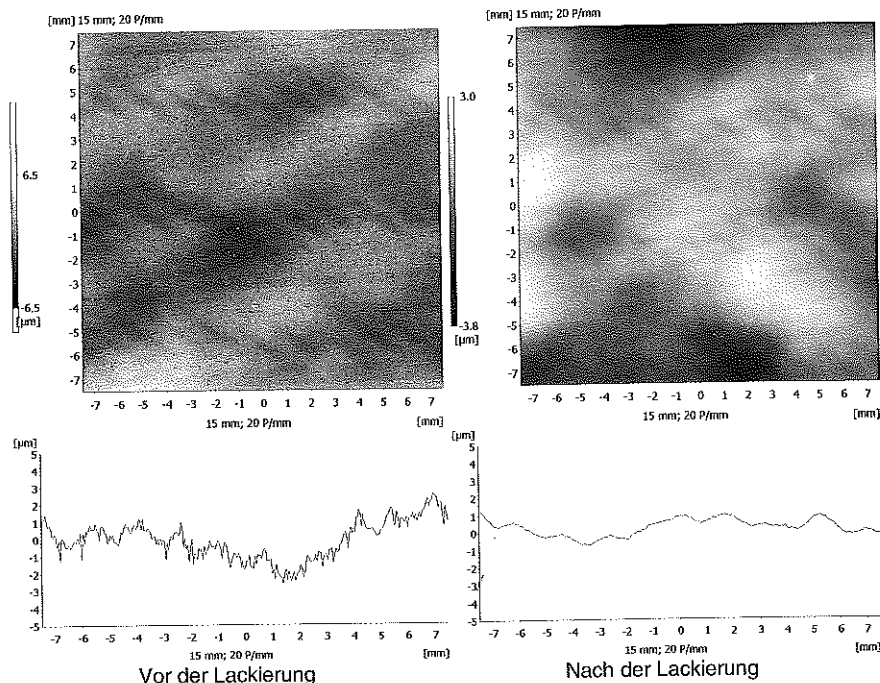


**Abbildung 7.19:** Schliffbild eines konventionell lackierten CFK-Musterbauteils

in den Gegenüberstellungen der Welligkeitswerte wurde nicht berücksichtigt, ob die Oberflächenstrukturen regelmäßig oder unregelmäßig auf der Oberfläche verteilt sind. Bei einer optischen Bewertung zeigt sich, dass insbesondere die regelmäßigen Störungen, die eine größere flächige Ausdehnung haben, nur wenig von der Lackierung abgedeckt werden. Vielmehr bewirkt die Lackierung als hochglänzende Schicht eine Verstärkung der optischen Wahrnehmung der Störungen.

Beispielhaft sind in Abbildung 7.20 Laserprofilometrie-Bilder der selben CFK-Oberfläche vor und nach der Lackierung gezeigt.

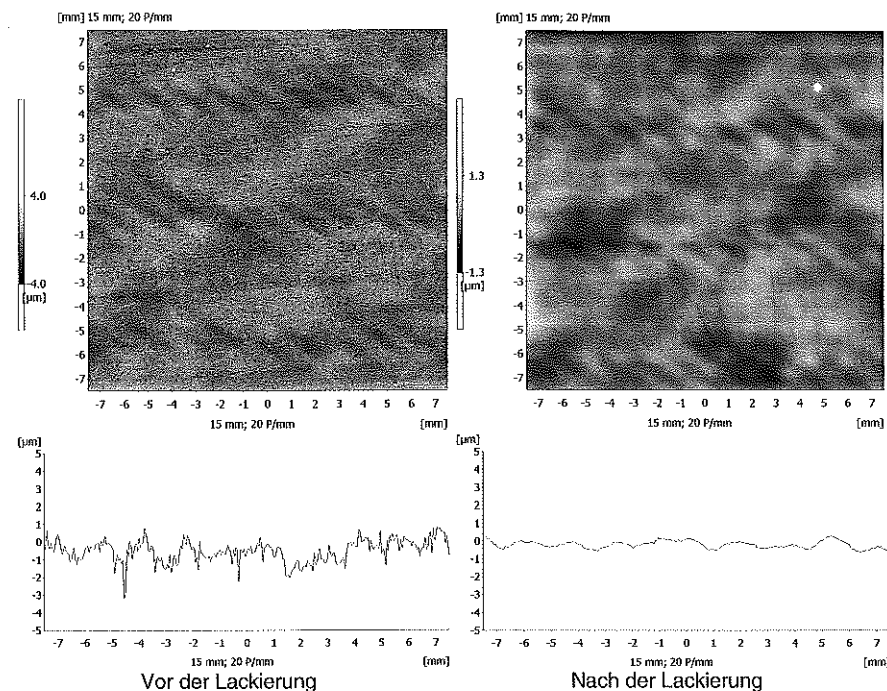




**Abbildung 7.20:** Laserprofilometrie-Bilder und Linienscans einer CFK-Oberfläche vor und nach einer konventionellen Lackierung

Um die Faserstrukturen bei der Darstellung besonders hervorzuheben und die langwellige Orangenhaut des Lacksystems auszuschalten, bietet sich die Verwendung eines Hochpassfilters zur Bearbeitung der Oberflächendaten an. Diese gefilterten Daten sind in Abbildung 7.21 als Graustufen-Bilder und Linienscans dargestellt. Hier wird das tatsächliche Abdeckungsvermögen eines konventionellen Lacksystems durch den Vergleich ohne und mit Lackierung deutlich.

Der Vergleich zeigt, dass die Abzeichnungen der Faserverstärkung zu einem gewissen Anteil ausgeglichen und vermindert werden. Die Lackierung kann die kurzwelligen Störungen, welche im Bereich der Oberflächenrauheit liegen, zum Großteil eliminieren. Die regelmäßigen langwelligen Strukturen aus der Faserdurchzeichnung hingegen werden nur zum Teil ausgeglichen und nur in ihrer Amplitude gemildert.



**Abbildung 7.21:** Laserprofilometrie-Bilder und Linienscans einer CFK-Oberfläche vor und nach einer konventionellen Lackierung

In der optischen Beurteilung der lackierten Oberfläche sind selbst diese abgeschwächten Störungen durch die hochglänzende, schwarze Lackierung sehr deutlich zu sehen. Deshalb kann die oben dargestellte Oberflächenqualität mit dieser Oberflächenstruktur des Substrats und dieser konventionellen Kunststofflackierung nicht den Ansprüchen an die automobilen Außenhaut genügen.

Deswegen ist eine Anpassung der gesamten Kunststofflackierung, bestehend aus Grundierung, Basis- und Klarlack, an die Substratbeschaffenheit notwendig. Das Potenzial zur Abdeckung der Faserabzeichnung, welches hier schon im Ansatz erkennbar ist, kann mit der konventionellen Lackierung für Kunststoffteile aus unverstärkten Thermoplasten nicht ausgeschöpft werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wird im Folgenden eine Optimierung für die eingesetzte Grundierungsschicht durchgeführt.

7.2.2 Grundierungen, Funktionsbeschichtungen

Der Zwischenschicht zwischen dem Substrat, in diesem Fall CFK, und dem Decklack, bestehend aus Basis- und Klarlack, kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Diese Grundierung kann je nach Anforderungsprofil, welches von der Substratseite und von der Decklackseite gestellt wird, verschiedene Funktionen erfüllen. Dabei kommen sowohl Grundierungen aus einer einzelnen Schicht zum Einsatz als auch auf die speziellen Funktionen abgestimmte Mehrschichtsysteme.

Die Grundierung hat folgende Anforderungskriterien zu erfüllen (siehe [127]):

- gute Haftung zum Substrat
- gute Haftungseigenschaften in Bezug auf die nachfolgenden Decklackschichten
- gute Füllkraft (Egalisierung von Unebenheiten)
- gute Verlaufseigenschaften
- gute Schleifbarkeit (Beseitigung von Schmutz- und Staubpartikeln)
- Abdeckvermögen und Grundfarbe für Decklackierung
- guter Decklackstand (Aussehen der Endlackierung)

Zur Verbesserung der Haftungseigenschaften auf dem Substrat kann eine Einzelschicht Haftvermittler eingesetzt werden. Bei besonders starken Unebenheiten und Porigkeit kommen Füller und Dickschichtfüller zum Einsatz. Sperrschichten verhindern bei Bedarf den Stoffübergang zwischen Substrat und der Decklackierung. Um bei bestimmten Decklacksystemen den Farbton zu beeinflussen, werden farbige Füller als Grundlage für die Farblackierung eingesetzt.

Für das Abdeckungsvermögen gegenüber dem Faserdurchzeichnen und Porigkeit sind insbesondere eine hohe Füllkraft und optimierte Verlaufseigenschaften gefordert. Hierfür spielen neben Lösemittel und Filmbildner auch besondere Additive wie Verlaufszusätze eine große Rolle. Eingesetzt werden lösemittelbasierte oder wasserbasierte Grundierungen mit verschiedener chemischer Grundlage, wie Polyurethan- oder Epoxidharzsysteme. Die Zusammensetzung der Grundierungen aus den einzelnen Bestandteilen (Filmbildner, Lösemittel, Additive und Füllstoffe) stellt eine sehr große Vielfalt dar. Auch die Applikationstechnik, Auftrags- und Einbrennlage und insbesondere die Schichtdicken können zur Optimierung des Erscheinungsbildes der lackierten Oberfläche variiert werden.

Um die Möglichkeiten der Oberflächenverbesserung durch geeignete Grundierungen zu untersuchen, wurden mit Musterbauteilen Lackierversuche durchgeführt. Dabei hatten die im RTM-Verfahren hergestellten Musterbauteile einen reproduzierbaren Qualitätsstand mit gleichen Oberflächenstrukturen in bestimmter Gestalt und Amplitude. Während die Materialien und Schichtdicken der Grundierungen variiert wurden, kam eine jeweils auf die Grundierung abgestimmt zehn verschiedene Grundierungen untersucht, wobei teilweise die Schichtdicke und in einem Fall die Klarlackdicke zusätzlich variiert wurden.

Tabelle 7.3: Eingesetzte Grundierungen und Variationen

Bezeichnung	Grundierung	Lieferant	Schichtstärke	Decklackierung
G1, dünn	Lösemittelbasierter Füller	A	15-20 µm	*
G1, mittel	Lösemittelbasierter Füller	A	40-50 µm	*
G1, dick	Lösemittelbasierter Füller	A	70-80 µm	*
G2, dünn	Wasserbasierter Füller	B	15-20 µm	*
G2, mittel	Wasserbasierter Füller	B	40-50 µm	*
G2, dick	Wasserbasierter Füller	B	70-80 µm	*
G3, dünn	Lösemittelbasierter Füller	C	15-20 µm	*
G3, mittel	Lösemittelbasierter Füller	C	40-50 µm	*
G4, dünn	Lösemittelbasierter Epoxid Füller	D	20-30 µm	*
G4, mittel	Lösemittelbasierter Epoxid Füller	D	50-60 µm	*
G5, 2xKL	Wasserbasierter Primer	B	ca. 55 µm	*+ Klarlack C ca. 40 µm
G5, 1xKL	Wasserbasierter Primer	B	ca. 55 µm	*
G6, KLA	Lösemittelbasierte Grundierung	E	ca. 20 µm	* mit Klarlacksystem A
G6, KLB	Lösemittelbasierte Grundierung	E	ca. 20 µm	* mit Klarlacksystem B
G7, KLA	Lösemittelbasierte Grundierung	E	ca. 15 µm	* mit Klarlacksystem A
G8	Lösemittelbasierter Primer	B	ca. 90 µm	*
G9	Lösemittelbasierter Primer	B	ca. 50 µm	*
G10	Lösemittelbasierter Primer	B	ca. 80 µm	*

\*)Standard-Decklacksystem: Basislack schwarz, ca. 20 µm, Klarlacksystem C ca. 40 µm

Das hier verwendete Decklacksystem wird zur Kunststofflackierung von Außenhautbauteilen in der Serie verwendet. Abbildung 7.22 zeigt einen Vergleich der LW-Werte für verschiedene Grundierungen mit anschließender konventioneller Decklackierung.

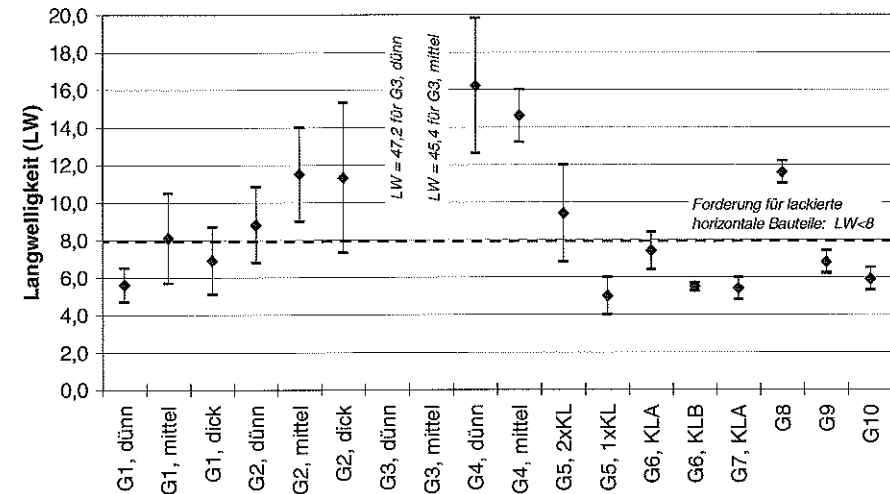
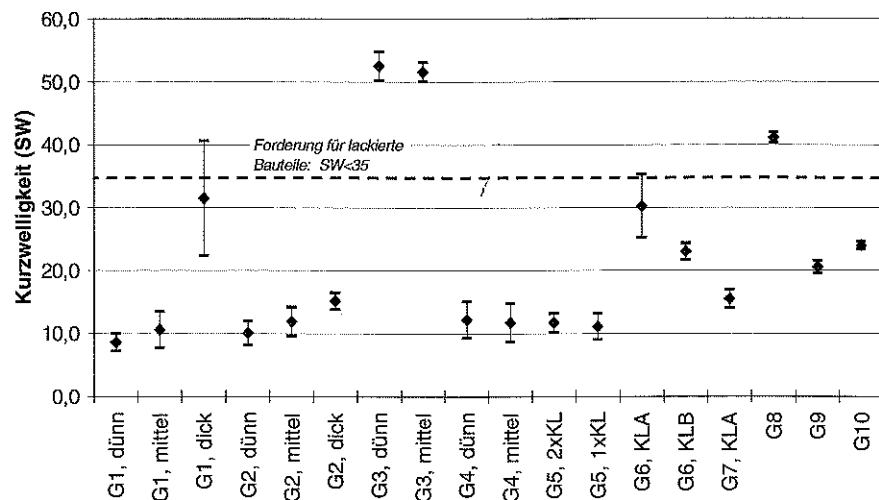


Abbildung 7.22: LW-Vergleich verschiedener Grundierungsschichten mit anschließender konventioneller Decklackierung

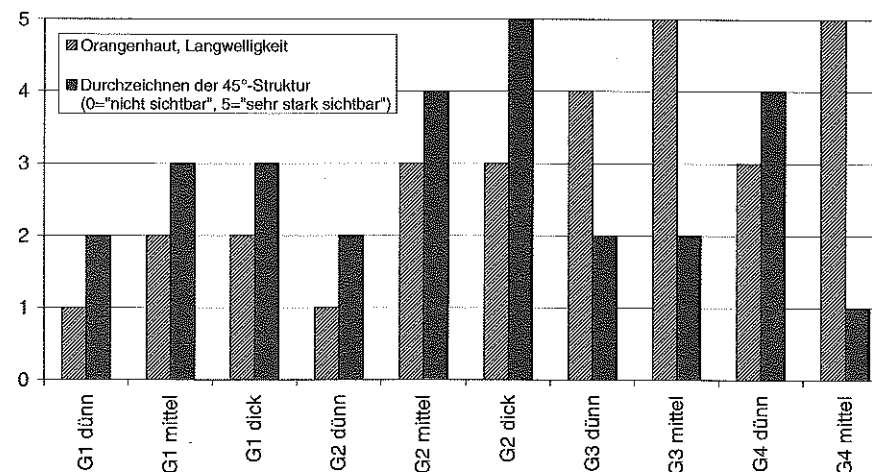
Bei gleicher Oberflächenstruktur der Musterteile, mit LW-Werten von 5 bis 7 und SW-Werten von 15 bis 20, zeigten die verschiedenen Grundierungen unterschiedliche Auswirkungen. So haben einige Grundierungen (G3, G4 und G8) eine so starke Eigenstruktur, dass die LW-Werte über dem Schwellwert von 8 für lackierte horizontale Bauteile liegen. Mit den Grundierungen G1, G2, G5, G6, G7, G9 und G10 können niedrige LW-Werte realisiert werden. Eine Grundierung mit sehr hohem Feststoffanteil (G3) für gutes Abdeckungsvermögen liegt in den erzielten LW-Werten mit über 40 außerhalb des dargestellten Wertebereichs. Dennoch liegt die Langwelligkeit bei fast allen Systemen unter dem Grenzwert für vertikale lackierte Bauteile.

Die Auswirkungen auf die Kurzwelligkeit sind nur bei den Systemen G3 und G8 mit einer Überschreitung des Grenzwertes von 35 nicht akzeptabel, wie in Abbildung 7.23 gezeigt. Bei den Systemen G1, G2, G3 und G4 ist kein Effekt der Schichtdicke auf die SW-Werte zu erkennen.



**Abbildung 7.23:** SW-Vergleich verschiedener Grundierungsschichten mit anschließend konventioneller Decklackierung

Während die Betrachtung der LW- und SW-Werte Rückschlüsse auf die Eigenstruktur der Grundierung zulässt, sagt sie wenig über das Abdeckungsvermögen im Hinblick auf das Faserdurchzeichnen aus. Dazu sind die Systeme G1 bis G4 von drei Fachleuten optisch bewertet worden (siehe Abbildung 7.24).



**Abbildung 7.24:** Optische Bewertung unterschiedlicher Grundierungen

Es zeigt sich klar, dass bei einer starken Eigenstruktur der Beschichtung, z.B. bei den Systemen G3 und G4, der Effekt des Faserdurchzeichnens als schwach beurteilt wird. Da das Faserdurchzeichnen bei allen Mustern noch klar zu erkennen ist, kann keine dieser Grundierungen die Oberflächenanforderungen an horizontale Bauteile erfüllen. Während die Systeme G3 und G4 die Faserabzeichnungen nur unter einer starken Langwelligkeit abmildern können, zeigen die Grundierungen G1 und G2 in kleinen Schichtstärken ein ähnlich gutes Abdeckungsvermögen. Auch mit den Systemen G5 bis G8 können die Faserstrukturen in  $\pm 45^\circ$ -Orientierung nicht gänzlich abgedeckt werden. Bei der Wahl bestimmter Betrachtungswinkel und -entfernungen sind die Faserabzeichnungen für den geschulten Betrachter immer noch erkennbar. Die hohen LW-Werte einiger Grundierungen schließen zwar einen Einsatz bei horizontalen Bauteilen aus, nicht aber den bei vertikalen Außenhautflächen. Hier ist bei ausreichender Abdeckung der regelmäßigen Störung aufgrund des höheren Grenzwertes eine Anwendung denkbar. Für die Grundierungen mit niedrigen LW-Werten, G1, G5, G6, G7, G9 und G10, ist ein Einsatz bei horizontalen Bauteilen nur dann möglich, wenn die minimale Faserabzeichnung akzeptiert wird, die unter speziellen Beleuchtungsbedingungen, Betrachtungswinkeln und -entfernungen noch sichtbar ist.

Aufgrund der starken Unterschiede im Abdeckungsvermögen der verschiedenen Grundierungen sind weitere Optimierungen für eine auf das Substrat angepasste Beschichtung zielführend. Dies geschieht sowohl mit den Lackherstellern als auch mit Firmen, die sich auf Kunststofflackierungen und die Beschichtungen besonderer Substrate spezialisiert haben. Da die Möglichkeiten der Materialkombinationen und -formulierungen zahlreich sind, ist das hier im Ansatz gezeigte Potenzial noch nicht ausgeschöpft.

Zudem zeigte die durchgeführte Untersuchung die Auswirkung einer nachträglichen Beschichtung der Oberflächen der CFK-Bauteile. Die hier betrachtete Oberflächenqualität der CFK-Bauteile kann nach den Material- und Verfahrensoptimierungen in den vorangegangenen Kapiteln mit praktikablem Material- und Verfahrensaufwand produziert werden. Beim Einsatz von Sondermaterialien, bei denen einige Aspekte der Verarbeitbarkeit im Serienprozess noch ungeklärt sind, und bei einer aufwendigen Verfahrensgestaltung für den RTM-Prozess können CFK-Bauteile mit höherer Oberflächenqualität hergestellt werden. Dies bewirkt jedoch neben den Bearbeitungsproblemen mit den Halbzeugen höhere Kosten im Anlageninvest- und -betrieb sowie höhere Zykluszeiten beim RTM-Verfahren. In RTM-Versuchen mit diesen zusätzlichen Material- und Verfahrensaufwendungen war es möglich, CFK-Bauteile werkzeugfallend mit einer Oberflächenqualität herzustellen, die auch mit einem konventionellen Grundierungsschicht zur Egalisierung von noch minimal vorhandenem Faserdurchzeichnen sind noch bessere Ergebnisse zu erwarten.

### 7.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Da die lackierte Fahrzeugaußenhaut hohen dekorativen und funktionalen Anforderungen genügen muss, kam als nachträgliche Beschichtung der CFK-Bauteile eine konventionelle, im Serieneinsatz befindliche Kunststofflackierung zum Einsatz. Diese kann das Faserabzeichnen vermindern und so die Oberflächenqualität des Bauteils verbessern. Während kurzwellige Störungen gut egalisiert werden, kann bei langwelligen Strukturen nur die Amplitude verringert werden (siehe Abbildung 7.18 und Abbildung 7.20). Allerdings verstärkt die hochglänzende Lackierung die optische Wahrnehmung von regelmäßigen Oberflächenstrukturen selbst bei sehr kleiner Amplitude.

Der Vergleich von verschiedenen Grundierungen als Zwischenschicht zwischen Substrat und Decklacksystem, zeigte große Unterschiede im Abdeckungsvermögen und der Eigenstruktur für lösemittelbasierte oder wasserbasierte Systeme und verschiedene Schichtstärken. Obwohl für viele Variationen die am lackierten Teil gemessenen Welligkeitswerte unterhalb der geforderten Grenzwerte lagen (siehe Abbildung 7.22), konnte die Faserabzeichnung meist nicht ausreichend abgedeckt werden. Einige Grundierungen bewirken eine Reduzierung der Faserabzeichnung, so dass diese nur noch aus bestimmten Betrachtungswinkeln und -entfernungen bei besonderen Beleuchtungsverhältnissen erkennbar sind. Diese vorliegenden Ergebnisse wurden mit einem leicht reproduzierbaren Qualitätsstand der CFK-Bauteile erreicht. Für Musterteile mit höherer Oberflächenqualität werden ebenfalls bessere Ergebnisse mit den abgestimmten Grundierungen erwartet.

Es zeichnet sich hier eine Lösung für horizontale Bauteile mit Sondermaterialien und hohem prozesstechnischen Aufwand ab. Bei der Verwendung von heute serientauglich verarbeitbaren Materialien in einem vertretbaren Prozessaufwand muss dies durch weitere Entwicklungen zur Abstimmung der Grundierungsschicht und der Decklacksschichten nachgewiesen werden. Der

Einsatz für vertikale Außenhautbereiche hingegen ist bei Verwendung geeigneter Grundierungen mit dem dargestellten Qualitätsstand möglich.

## 7.3 Flächige Nacharbeit

Beim derzeitigen Entwicklungsstand kann es je nach eingesetzten Materialien und Verfahrenseinstellungen, aber auch aufgrund des Anforderungsprofils notwendig sein, die Bauteiloberflächen durch ein flächiges Nacharbeiten auf den notwendigen Qualitätsstand anzuheben. Eine solche Nacharbeit der Oberfläche dient dem Eliminieren der regelmäßigen Störungen, die durch das Durchzeichnen der gerichteten Endlosfaserverstärkung verursacht werden.

### 7.3.1 Der Einfluss flächiger Nacharbeit auf die Oberflächenqualität

Flächiges Schleifen ist für Außenhautanwendungen mit GFK in mittlerer Seriengröße und CFK in Kleinserien Stand der Technik, um die Oberflächenqualität der Bauteile nach dem RTM-Prozess und vor der Decklackierung anzuheben. Kaum eine Anwendung von RTM in der automobilen Außenhaut kann derzeit auf ein solches flächiges Nacharbeiten verzichten (siehe Kapitel 2.2.1). Diese Nacharbeit kann aufgrund der dreidimensional geformten Außenhautbauteile mit Krümmungen und Kanten nicht prozesssicher automatisiert werden und erfolgt deshalb manuell mit Schleifapparaten. Bei manuellen Bearbeitungsprozessen ist die Gewährleistung eines gleichmäßigen Qualitätsstandes schwierig und somit die Prozesssicherheit gefährdet. Für einen serientauglichen Prozess muss aus Qualitätsgründen und für größere Stückzahlen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit eine manuelle, flächige Nacharbeit der CFK-Bauteile vermieden bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Für sehr kleine Stückzahlen hingegen kann eine solche Nacharbeit durchaus eine wirtschaftliche Methode zur Erfüllung der Qualitätskriterien sein, wie die Anwendungen am Markt beweisen. Hier bewirkt ein höherer Fertigungsaufwand durch manuelle Bearbeitung eine geringere Mehrung der Herstellkosten pro Bauteil als zusätzliche Investitionsaufwendungen für teure Werkzeuge und Anlagen.

Zur Ermittlung der notwendigen flächigen Nacharbeit wurden an vergleichbaren CFK-Musterplatten Versuche mit verschiedenen Grundierungen und Nacharbeitmethoden durchgeführt. Dabei handelte es sich immer um einen oder mehrere Schleifvorgänge in verschiedenen Beschichtungszuständen und mit unterschiedlichen Schleifmitteln. Zur Kunststofflackierung kam ein konventionelles Decklacksystem mit Serienfreigabe zum Einsatz.

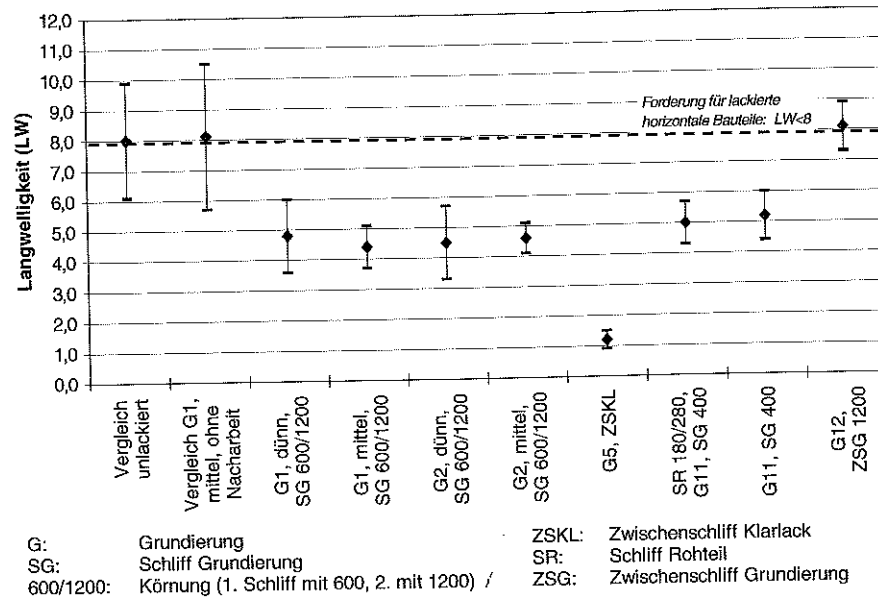


Abbildung 7.25: LW-Vergleich verschiedener Nacharbeitsmethoden

Die Ergebnisse der Nacharbeitsversuche sind in Abbildung 7.25 für die Langwelligkeit und in Abbildung 7.26 für die Kurzwelligkeit dargestellt. Wie erwartet kann durch einen Zwischenschritt mit flächigem Schleifen die Langwelligkeit reduziert werden. Durch das Schleifen der Grundierungsschicht werden die Oberflächenstrukturen eingeebnet. Nachfolgend applizierte Grundierungs- und Decklackschichten erhöhen die Langwelligkeitswerte anschließend durch ihre Eigenstruktur. Dieser Effekt ist am Beispiel G5 mit einem Zwischenschliff im Klarlack zu belegen. Hier ist die geringe Langwelligkeit auf die Eigenstruktur der letzten Klarlackschicht zurückzuführen. Insgesamt führen alle Nacharbeitsmethoden zu niedrigen Werten für die Langwelligkeit bis auf Grundierung 12.

Alle Nacharbeitsmethoden bewirken eine Steigerung der Kurzwelligkeit im Vergleich zur Grundierung ohne Schleifschritte (siehe Abbildung 7.26 im Vergleich zu Abbildung 7.23). Zudem zeigt sich hier ein Einfluss des Schleifmittels. Eine 400er-Körnung führt zu höheren SW-Werten aufgrund der stärkeren Aufräumung der Oberfläche als eine Kombination von 600er und 1200er Körnung. So erscheinen hier zwei Methoden zielführend. Der Schliff der Grundierung in zwei Schritten mit 600er und 1200er Körnung oder der Zwischenschliff der Klarlackschicht.

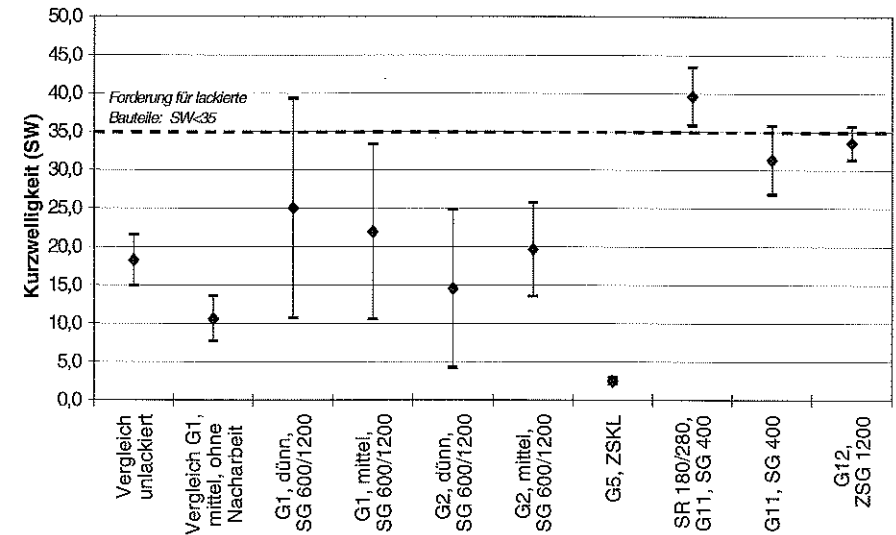


Abbildung 7.26: SW-Vergleich verschiedener Nacharbeitsmethoden

Die optische Beurteilung ist in Abbildung 7.27 dargestellt. Die verschiedenen Nacharbeitsmethoden führen alle zu einer starken Verminderung des Faserdurchzeichnens. Bei einer Beurteilung mit dem Wert 1 ist das Faserdurchzeichnen nur noch aus einer bestimmten Betrachtungsrichtung und -entfernung zu erkennen, bei 0 gar nicht mehr.

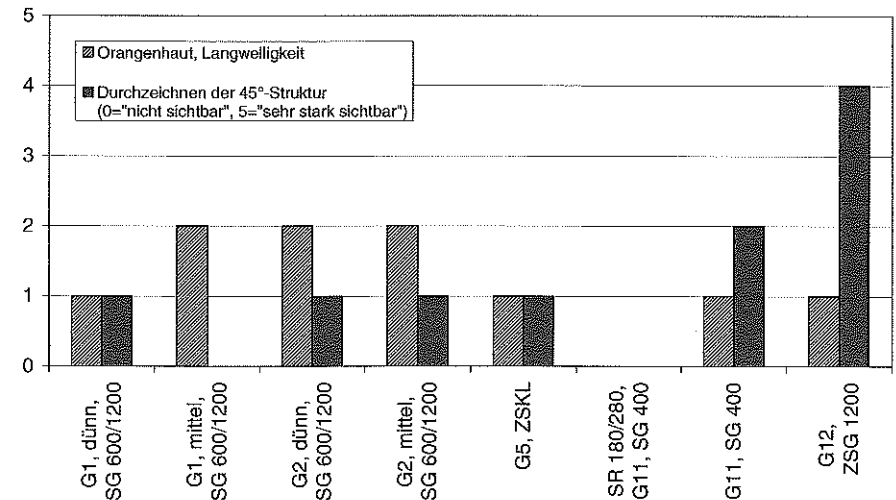


Abbildung 7.27: Optische Bewertung unterschiedlicher Nacharbeitsmethoden

Eine Eliminierung des Faserdurchzeichnens wird bei Verwendung der Grundierung G1 in mittlerer Schichtstärke und einem Schleifen der Grundierung in zwei Stufen mit Körnung 600 und 1200 erreicht. Eine kleinere Schichtstärke führt zwar zu einer besseren Beurteilung der Welligkeit, kann aber das Faserdurchzeichnen nicht vollständig beseitigen. Gleichermaßen ist der Zwischenschliff der Klarlackschicht bei Grundierung G5 beurteilt. Die sehr aufwendige Methode mit großen Schichtdicken und drei Schleifgängen für Grundierung 11 führt insgesamt zur optisch „glattesten“ Oberfläche. Allerdings liegt hier die Kurzwelligkeit in einem unzulässigen Bereich.

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen, dass durch flächiges Schleifen in bestimmten Beschichtungszuständen und mit optimierter Nacharbeitsmethode die Qualitätsanforderungen an horizontale lackierte Außenhautbauteile erreicht werden können.

### 7.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch eine geeignete mechanische Nacharbeit kann die Oberflächenqualität der CFK-Bauteile auf ein Niveau gebracht werden, welches den Anforderungen an die lackierte Außenhaut genügt. Die visuelle Beurteilung weist zwei Grundierungen (G1 und G5) und zwei Nacharbeitsmethoden (SG 600/1200 und ZSKL) als zielführend aus, um sowohl das Faserdurchzeichnen zu eliminieren als auch die geforderten Grenzwerte von Lang- und Kurzwelligkeit für lackierte horizontale Außenhautbereiche zu erfüllen.

Dabei entsprach die Oberflächenqualität der eingesetzten Musterbauteile einem Stand, der mit mittlerem Material- und Verfahrensaufwand werkzeugfallend erzeugt werden kann. Für sehr geringe Stückzahlen bietet die flächige Nacharbeit eine Backup-Lösung für die Darstellung der geforderten Oberflächenqualität auch für horizontale Bauteile. Allerdings ist beim manuellen Prozessschritt Schleifen die kontinuierliche Gewährleistung der Qualität auf der gesamten Bauteilfläche und für alle Bauteile weiterhin problematisch.

## 8 Erreichte Oberflächenqualität von Musterbauteilen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erfüllung dieser Oberflächenanforderungen für Außenhautbauteile nach den Standards der Automobilindustrie mit der Werkstoff-Verfahrens-Kombination CFK-RTM. Da bei diesen Materialien das Faserdurchzeichnen das Hauptproblem für die Oberflächenqualität darstellt, zielt die vorliegende Entwicklung vorrangig auf eine Reduzierung oder Eliminierung dieses Phänomens. Die obere Referenz für die Class-A-Oberflächenqualität stellen lackierte Stahlblech-Bauteile aus der laufenden Serienproduktion dar, wie z.B. ein lackiertes Stahlschiebedach. In Abbildung 8.1 ist das Oberflächenprofil in einem Laserprofilometer-Bild und einem Linienscan dargestellt. Die Oberflächenqualität gemäß den Class-A-Anforderungen für horizontale Außenhautbauteile spiegelt sich in den niedrigen Welligkeitswerten wider.

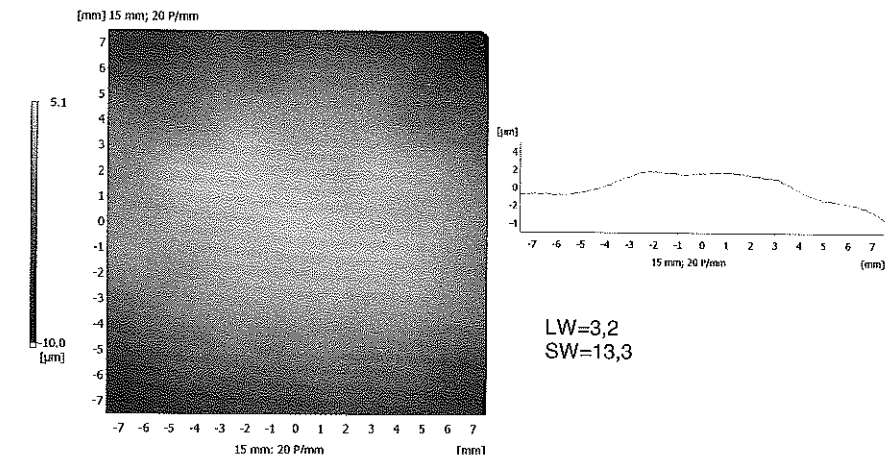


Abbildung 8.1: Oberflächenprofil eines lackierten Stahlschiebedachs zum Vergleich

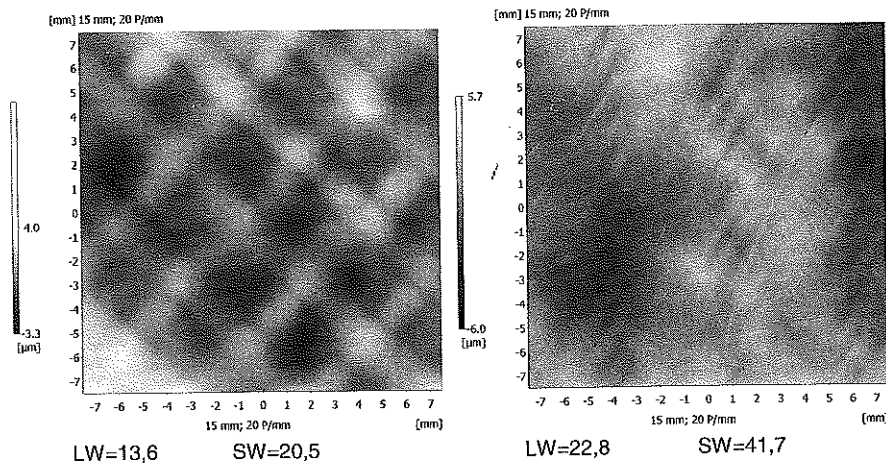
Im Folgenden wird der Weg vom Ist-Stand der erreichbaren Oberflächenqualität mit CFK-RTM vor der Entwicklung hin zur Class-A-Fähigkeit aufgezeigt. Die Beiträge der einzelnen Teilsysteme Materialien, Verfahren und Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität werden beschrieben und anhand von Beispielen dargestellt. Anschließend wird die Abstimmung des Gesamtsystems unter Nutzung der Verbesserungsmöglichkeiten in allen drei Teilsystemen beschrieben, die zum Ziel der Class-A-Oberflächenqualität führt.

### 8.1 Ist-Stand vor der Entwicklung

Die Oberflächenqualität, die im RTM-Verfahren dargestellt werden kann, hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab, vor allem von den eingesetzten Materialien, den Verfahrensparametern und der Oberflächenbeschichtung. Daher wird der Qualitätsstand, der vor den hier vorgestellten Optimierungen erreicht werden konnte, unter folgenden Prämissen ausgewählt:

- gleiche Einsatzmöglichkeiten, daher gleiche Dicke, Flächengewicht und mechanische Eigenschaften, daher auch
- vergleichbarer Lagenaufbau (Anteile an Kohlenstoff- und Glasfaserverstärkung), mit Oberflächenvlies, Bidiagonal-Gelege aus Kohlenstofffaser, Textilglasmatte
- hochreaktives EP-Harzsystem für kurze Zykluszeiten
- „Standard“-RTM-Prozess mit Drücken bis 10 bar und kurzen Zykluszeiten
- optimale Werkzeugtechnik (druck- und vakuumdicht, Oberfläche verchromt, poliert)
- Bauteile nicht beschichtet und nicht lackiert, RTM-Rohteile

Die Oberflächenqualität von zwei CFK-Musterteilen, welche unter obigen Prämissen zu Beginn der RTM-Versuchsreihen mit geeigneten Materialien hergestellt wurden, ist in Abbildung 8.2 in Form von Oberflächenprofilen dargestellt.



Oberflächenprofil eines Musterteils mit ungeeignetem Multiaxialgelege, optimiertem Oberflächenvlies, Matrixsystem A1, WZ\_T = 88 °C

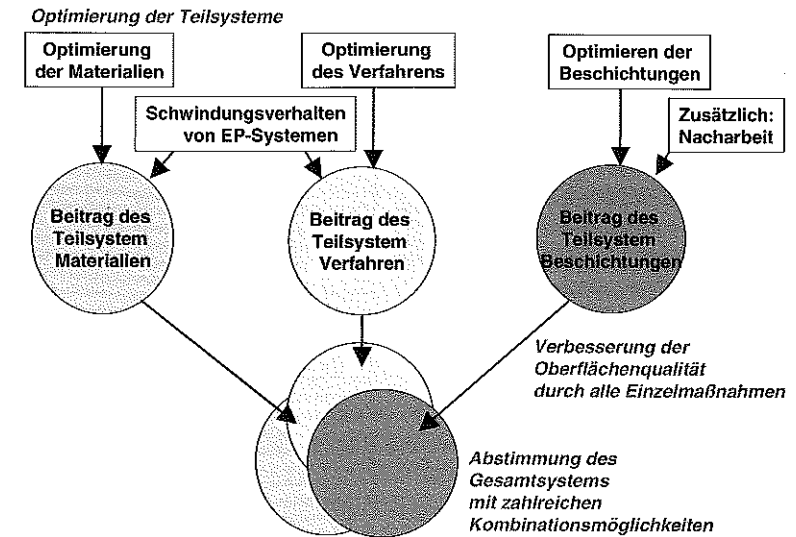
Oberflächenqualität eines Musterteils mit abgestimmtem Multiaxialgelege, Standard-Oberflächenvlies, Matrixsystem A1, WZ\_T = 110 °C

**Abbildung 8.2:** Laserprofilometrie-Bilder von unlackierten CFK-Musterteilen mit Qualitätsstand vor der Entwicklung (mit verwirkten Multiaxialgelegen)

Im lackierten Zustand liegen die Welligkeitswerte für obige Beispiele jenseits der geforderten Grenzwerte für die Langwelligkeit horizontaler lackierter Außenhautbauteile. Schwerwiegender sind die starken regelmäßigen Abzeichnungen, die nach einer Lackierung noch stärker sichtbar sind und sich über die gesamte Bautoberfläche erstrecken. Mit diesem Qualitätsstand ist der Einsatz von CFK weder im horizontalen noch im vertikalen Außenhautbereich denkbar.

## 8.2 Ergebnisse der Optimierung der Teilsysteme

Der Lösungsansatz in der vorliegenden Arbeit liegt in einer Optimierung des Gesamtsystems aus Materialien, Verfahren und Beschichtungen. Nach diesem Ansatz liefern die Optimierungen der Teilsysteme jeweils einen Beitrag zur Verbesserung der Oberflächenqualität des Gesamtsystems „lackiertes CFK-Außenhautbauteil“ (siehe Abbildung 8.3).

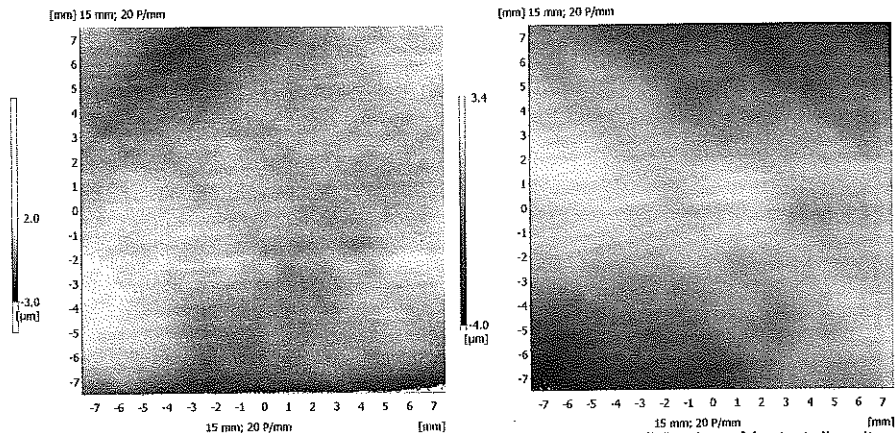


**Abbildung 8.3:** Optimierung der Teilsysteme und Einfluss auf das Gesamtsystem

### Materialien:

Bei der Optimierung der Materialien konnten große Verbesserungen der Oberflächenqualität erreicht werden. Der Vergleich von fünf hochreaktiven EP-Harzsystemen zeigte Vorteile für das Matrixmaterial B2 in Bezug auf die erreichbare Oberflächenqualität und die Reaktivität (siehe Abbildung 4.7). Weiterhin wurde die entscheidende Rolle der Faserhalbzeuge für Gestalt und Stärke der Faserabzeichnung herausgestellt. Gewebe scheiden aufgrund der regelmäßigen „Schachbrett“-Muster an der Oberfläche für weitere Betrachtungen aus. Die Verwendung von abgestimmten verwirkten Multiaxialgelegen aus Kohlenstofffasern stellt derzeit die beste Lösung hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und der Oberflächenqualität dar (siehe Abbildung 8.4 links). Verklebte Unidirektionalgelege und multiaxiale Kombinationen davon ermöglichen die Erzeugung von Oberflächen mit geringerer oder keiner erkennbaren Faserabzeichnung, wie in Abbildung 8.4 rechts gezeigt. Aufgrund der problematischen Verarbeitbarkeit sind sie derzeit bis auf bestimmte Anwendungen nur eine mittelfristige Lösung.

Aufgrund des großen Einflusses der Faserhalbzeuge auf das Faserabzeichnen ist die Herstellung von Bauteilen mit Class-A-Qualität im RTM-Verfahren ohne die Optimierung der Materialien unmöglich.



Oberflächenprofil eines Musterteils mit abgestimmtem WIMAG und abgestimmtem Oberflächenvlies  
LW=5,4 SW=16,1

Oberflächenqualität eines Musterteils mit „Gitter“-UD-Gelege und abgestimmtem Oberflächenvlies  
LW=5,3 SW=18,0

**Abbildung 8.4:** Verbesserung der Oberfläche durch die Verwendung abgestimmter Faserhalbzeuge

#### RTM-Verfahren:

Die Verfahrensoptimierung führte anhand eines beispielhaft betrachteten EP-Systems zu neuen Erkenntnissen für die Prozessparameter und den Ablauf des RTM-Verfahrens. Die betrachteten Einflussgrößen Aushärtezeit, -temperatur, Vakuumeinstellung, Temperaturdifferenz und Nachdruck zeigten verschiedene Auswirkungen auf die Oberflächenqualität mit starken Wechselwirkungen. Für die Realisierung hoher Oberflächenqualität zeichneten sich zwei Strategien hinsichtlich der Aushärtezeit und -temperatur ab. Dabei bewirkten die niedrigen Werkzeugtemperaturen eine sichere Darstellung geringer LW- und SW-Werte unter dem Kompromiss der längeren Aushärtezeit. Entscheidenden Einfluss hatte ebenfalls der Druck, der nach der Injektion auf das noch flüssige Matrixsystem aufgebracht wurde. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität wurden Nachdrücke bis über 100 bar erzeugt, die weit außerhalb des üblichen Prozessfensters des konventionellen RTM-Verfahrens liegen. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Verfahrensoptimierung konnten mit verschiedenen Faserhalbzeugen Musterbauteile mit stark reduziertem Faserdurchzeichnen hergestellt werden. Für die gleichzeitige Erfüllung der Anforderung an den Mindest- $T_0$  der Bauteile kann bei Bedarf ein nachträglicher Temperschritt durchgeführt werden, der aber auf die Reaktivität des Harzsystems abgestimmt sein muss.

#### Schwindungsverhalten:

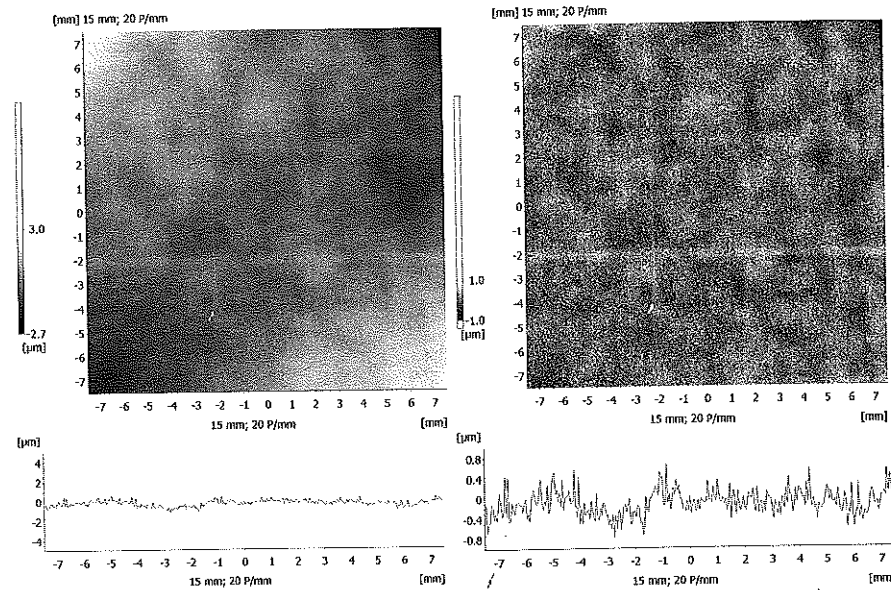
Durch die Untersuchungen zum Schwindungsverhalten konnte das Harzsystem B2 klar als bestes Material zur Erzeugung hoher Oberflächenqualität bei gleichzeitig hoher Reaktivität identifiziert werden. Für den Verfahrensablauf und die -parameter konnten Konsequenzen abgeleitet werden, um einen großen Anteil der Reaktionsschwindung auszugleichen. Beispielhaft ist der Unterschied im Schwindungsverhalten zwischen zwei zunächst geeigneten Harzsystemen bei ähnlichen Verarbeitungsparametern in Tabelle 8.1 angegeben. Dieser Unterschied wirkt sich am RTM-Bauteil direkt in einer schwächeren Faserabzeichnung für Harzsystem B2 aus.

**Tabelle 8.1:** Beispielhafter Vergleich der Schwindungsmessungen für zwei Harzsysteme

Aushärtung bei 80°C und Entformung bei 30 min	Harzsystem A1	Harzsystem B2
Chemische Schwindung aufgrund der Vernetzungsreaktion	4,79 %	3,14 %
Thermische Schwindung bei Abkühlung auf RT	1,82 %	1,18 %
Gesamtschwindung	6,67 %	4,32 %

Als Beispiel für die Oberflächenverbesserung durch die Optimierung des RTM-Verfahrens sind in Abbildung 8.5 zwei Laserprofilometer-Bilder eines Bauteils gezeigt. Durch die Kombination von optimalen Materialien und optimalen Verahenseinstellungen war es zum ersten Mal möglich, unlackierte RTM-Musterbauteile mit einer solchen Oberflächenqualität zu erzeugen, dass die Faserabzeichnungen mit bloßem Auge und auch anhand der Profilometer-Bilder nicht mehr erkennbar sind. Im Vergleich zum Musterbauteil in Abbildung 8.4 links, bei welchem gleiche Faserhalbzeuge eingesetzt wurden, ist überhaupt keine Vorzugsrichtung der Faserverstärkung mehr sichtbar. Auch die Betrachtung des Oberflächenprofils nach Anwendung eines Hochpassfilters in Abbildung 8.5 rechts lässt keine regelmäßige Störung erkennen. Bei dieser Musteroberfläche haben die größeren Oberflächenstörungen eine Amplitude, die unterhalb von  $\pm 1 \mu\text{m}$  liegt. Die an dieser Oberfläche gemessenen Welligkeitswerte betragen LW=4,3 und SW=15,1.





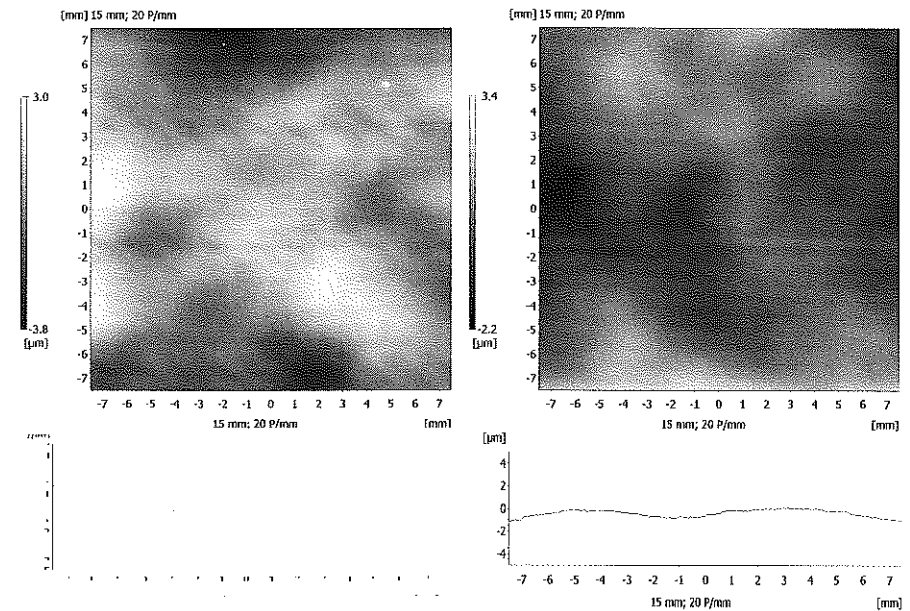
Oberflächenprofil und Linienscan ohne Filter  
LW=4,3 SW=15,1

Oberflächenprofil und Linienscan nach  
Hochpassfilter

**Abbildung 8.5:** Verbesserung der Oberflächenqualität durch optimale Materialien (Faserhalbzeuge und Harzsystem) und optimale Verfahrenseinstellungen

### Beschichtungen:

Bei der Optimierung der Beschichtungen wurden sowohl Prozess-Beschichtungen als auch nachträgliche Beschichtungen betrachtet. Der Einsatz von thermoplastischen Folien oder Gel-Coats bietet kurzfristig Lösungsmöglichkeiten zum Abdecken von Oberflächendefekten wie Faserdurchzeichnen und Porosität. Gleichzeitig steigert die Eigenstruktur der zusätzlichen Schicht die Langweiligkeit. Daher zeichneten sich in den Beschichtungsversuchen Lösungen für vertikale Außenhautbereiche ab. IPC und EP-Surfacing-Films zeigten bei hohem verfahrenstechnischen Aufwand ebenfalls Potenzial zum Abdecken des Faserdurchzeichnens. Auch die nachträgliche Beschichtung mit einer Kunststofflackierung führte zu einer Veränderung des Oberflächenbildes. So entsteht durch die Lackierung an der Bauteiloberfläche eine Eigenstruktur der einzelnen Bestandteile des Lackaufbaus. Es bietet sich die Möglichkeit, durch optimiertes Verlaufsverhalten eine Verminderung des Faserdurchzeichnens zu erreichen. Insbesondere die Auswahl geeigneter Grundierungen als Funktionsschicht zwischen Substrat und Decklack zeigte eine Steigerung der Oberflächenqualität im Gegensatz zur konventionellen Kunststofflackierung (siehe Abbildung 8.6).



Oberflächenprofil eines Musterteils mit  
konventioneller Lackierung  
LW=9,0 SW=14,5

Oberflächenqualität eines Musterteils mit  
optimierter Grundierung  
LW=5,6 SW=8,6

**Abbildung 8.6:** Verbesserung der Oberfläche durch die Verwendung abgestimmter Grundierungen

### Flächige Nacharbeit:

Durch die flächige Nacharbeit bei bestimmten Beschichtungszuständen können Bauteiloberflächen, die noch eine zu starke Faserabzeichnung aufweisen, auf die geforderte Oberflächenqualität der automobilen Außenhaut angehoben werden. Durch Nacharbeits- und Lackierversuche wurde der Nachweis erbracht, dass die Oberflächenstörungen bei geeigneter Grundierung und Nacharbeit eliminiert werden können (siehe Abbildung 7.25 und Abbildung 7.27). Aufgrund des manuellen Arbeitsaufwands stellt dies nur eine Backup-Lösung für die Realisierung von Kleinserien dar.

### 8.3 Ergebnisse der Abstimmung des Gesamtsystems

In den Teilsystemen Materialien, RTM-Verfahren und Beschichtungen bieten sich durch die vorliegende Entwicklung jeweils Verbesserungsmöglichkeiten an, die für sich alleine noch keinen Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut ermöglichen. Eine weitere Reduzierung der Oberflächenstrukturen ist bei allen Teilsystemen mit hohem Aufwand derzeit möglich oder zeichnet sich als Entwicklungspotenzial ab. So kann z.B. bei den Faserhalbzeugen durch den Einsatz von „Gitter“-Gelegen und Oberflächenvliesen, die derzeit im serientauglichen RTM-Prozess nur

schwer oder gar nicht verarbeitbar sind, eine sehr hohe Oberflächenqualität realisiert werden. Durch eine neuartige Gestaltung des RTM-Verfahrens hin zu sehr hohen Drücken ist mit anlagen- und -werkzeugtechnischem Aufwand ebenfalls eine Oberflächenverbesserung zu erreichen.

Je nach Aufwand, der in den Teilsystemen Materialien, RTM-Verfahren und Beschichtungen noch akzeptabel ist, können die Erkenntnisse aus den Teilsystemen kombiniert werden. Zielanwendungen sind neben den reinen horizontalen Außenhaut-Anbauteilen, wie Klappen und Dächer, auch die Strukturbauteile mit sichtbaren Anteilen wie der Seitenrahmen. Da für diese Bauteile im vertikalen Sichtbereich die Anforderungen an die Oberflächenqualität geringer sind, bieten sich kurzfristig Lösungen mit geringem Aufwand und fortgeschrittenem Entwicklungsstand an. Um die hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität horizontaler Außenhautbauteile bei jetzigem Entwicklungsstand erfüllen zu können, muss ein höherer Aufwand in den Teilsystemen betrieben werden und eine Abstimmung des Gesamtsystems erfolgen.

Zwei mögliche Wege zur Class-A-Oberflächenqualität mit unterschiedlichen Kombinationen von Materialien, Verfahrenseinstellungen und Beschichtungen sind beispielhaft in Abbildung 8.7 mit der entsprechenden Oberflächenqualität in Abbildung 8.8 gezeigt. Zum Vergleich ist in Abbildung 8.1 die Oberflächenqualität eines lackierten Stahlschiebedachs dargestellt, die als obere Referenz für die Class-A-Oberflächenqualität dienen kann.

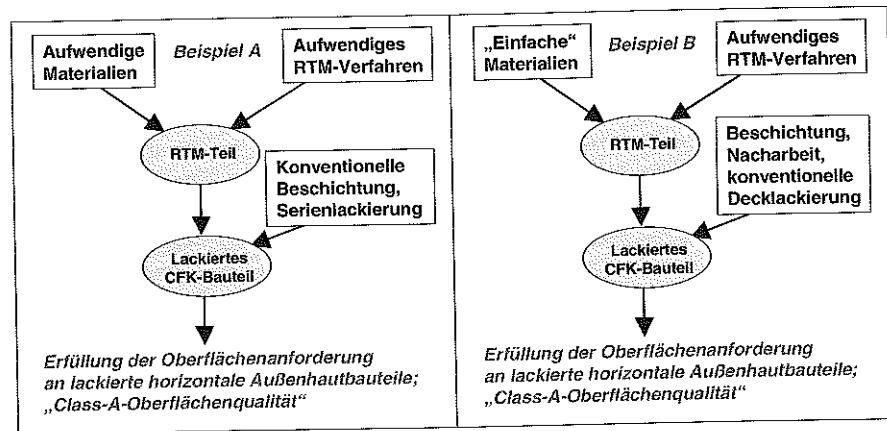


Abbildung 8.7: Zwei Beispiele zur Optimierung der Oberflächenqualität des Gesamtsystems durch unterschiedliche Kombinationen der Teilsysteme

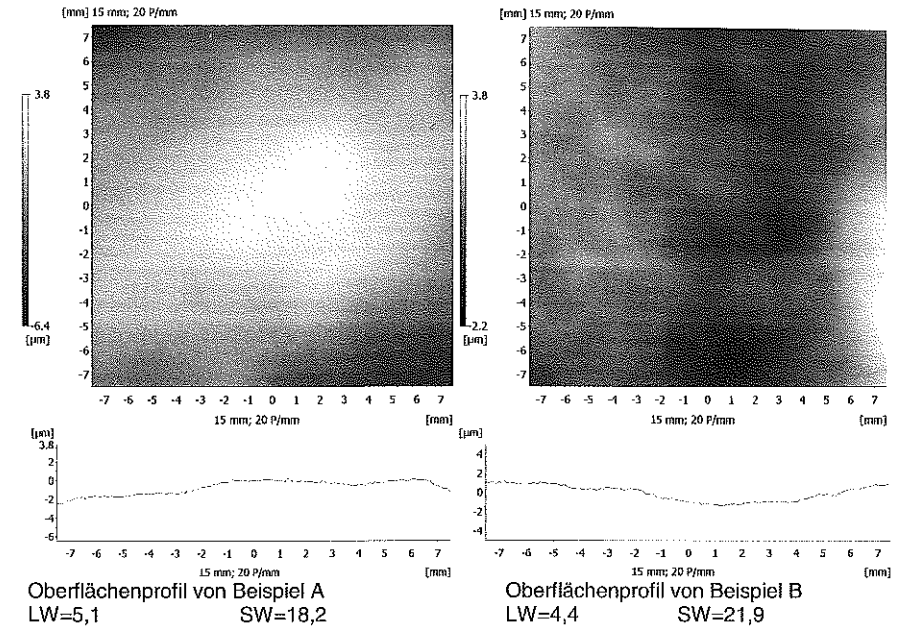


Abbildung 8.8: Zwei Beispiele zur Optimierung des Gesamtsystems

Mit den vorliegenden Ergebnissen sind erstmals kurzfristige Lösungen für Anwendungen im vertikalen Außenhautbereich mit akzeptablem Aufwand aufgezeigt. Weiterhin ermöglicht die Kombination der Verbesserungsmöglichkeiten aus den Teilsystemen mit hohem Aufwand den Einsatz in horizontalen Bauteilen. In der vorliegenden Arbeit wurden erstmalig einzelne Musterteile in RTM-Versuchen hergestellt, die diesen Class-A-Anforderungen genügen können. Mittelfristig ist großes Entwicklungspotenzial in den Teilsystemen vorhanden, um auch die für horizontale Bauteile geforderte Oberflächenqualität prozesssicher erzeugen zu können.

Diese Ergebnisse wurden an Musterbauteilen in Plattenform aus einem serientauglichen RTM-Werkzeug in einem serienähnlichen RTM-Prozess erzeugt. Für die Übertragbarkeit von diesen Plattenergebnissen auf eine dreidimensionale Bauteilform ist insbesondere das Umformen der Faserhalbzeuge beim Preformen bisher unberücksichtigt geblieben. Während die ermittelten Auswirkungen auf die Oberflächenqualität Gültigkeit haben, entstehen durch den zusätzlichen Umformschritt neue Anforderungen an die Faserhalbzeuge. Als konsequente Weiterführung des Themas wurden deshalb die Erkenntnisse der systematischen Optimierung von Materialien und Verfahren in einem Vorentwicklungsprojekt an einem dreidimensionalen Außenhautbauteil umgesetzt. Ziel dieses Projekts war es, eine CFK-Frontklappe serientauglich im RTM-Verfahren mit Class-A-Oberflächenqualität herzustellen.

## 9 Zusammenfassung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, die Oberflächenqualität von Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden so zu verbessern, dass ein Einsatz dieser Werkstoffe in der lackierten Fahrzeugaußenhaut möglich wird.

Zur Erschließung des Anwendungsfeldes der automobilen Außenhautbauteile wurde zunächst ein Anforderungskatalog für alle einzelnen Außenhautbauteile aus bestehenden Lastenheften, firmeninternen Richtlinien und Gesetzesvorschriften zusammengestellt. Während die höchsten Anforderungen hinsichtlich Oberflächenqualität und mechanischen Eigenschaften an die horizontalen dekorativen Außenhautbauteile (Klappen und Dächer) gestellt werden, gibt es auch strukturell belastete Bauteile (z.B. Seitenrahmen), die ganz oder teilweise im vertikalen Sichtbereich mit etwas geringeren Oberflächenanforderungen liegen. Eine Marktstudie zum Erfassen des Standes der Technik zeigte, dass bisher nur unverstärkte, kurz- oder wirrfaserverstärkte Kunststoffe die Außenhautanforderungen in Serienanwendungen erfüllen können. Noch verhindern sowohl hohe Materialpreise, nicht-serientaugliche Fertigungsverfahren und vor allem mangelnde Oberflächenqualität den Serieneinsatz von CFK in der Fahrzeugaußenhaut. In einem Vergleich verschiedener Fertigungsverfahren für Außenhautbauteile aus FKV wurde aufgrund der erreichbaren Oberflächenqualität bei gleichzeitig hohen spezifischen Eigenschaften ein großes Entwicklungspotential für das RTM-Verfahren hin zu einem serientauglichen Herstellungsprozess identifiziert.

Um dieses Entwicklungsziel zu erreichen, sollten abgestimmte Material-Verfahrens-Beschichtungs-Kombinationen gefunden werden, um die geforderte Class-A-Oberflächenqualität mit CFK-Bauteilen im RTM-Prozess zu erzielen. Die Hauptaufgabe hierbei ist das Verringern des Durchzeichnens der Verstärkungsstrukturen bedingt durch die inhomogene Verteilung der Verstärkungsfasern und den auftretenden chemischen und thermischen Schrumpfung des Matrixsystems bei der Bauteilherstellung. Mit einem eigens konstruierten und gefertigten RTM-Plattenwerkzeug aus Stahl wurden systematische Untersuchungen von Materialien, Verfahren und Beschichtungen durchgeführt.

In der Materialoptimierung konnte anhand von RTM-Versuchen mit fünf hochreaktiven Epoxidharzsystemen das System B2 hinsichtlich Oberflächenqualität und kurzer Zykluszeit als zielführend identifiziert werden. Im Vergleich der Verstärkungshalbzeuge schnitten die Kohlenstofffasergelege wesentlich besser als die -gewebe ab. Als ein Optimierungsergebnis konnte festgehalten werden, dass die verwirkten Multiaxialgelege mit abgestimmter Ablegetechnik und texturierten, multifilen Nähfäden in Trikot-Bindung derzeit Forderungen nach Oberflächenqualität und Verarbeitbarkeit am besten erfüllen. Aufgrund der Schwierigkeiten beim Preformen und Tränken der Halbzeuge bieten die hier ebenfalls untersuchten Gelege, die über ein aufgeklebtes Polyester-Gitter fixiert sind, zwar noch keine serientaugliche Lösung, führten aber in den RTM-Plattenversuchen zu noch besseren Oberflächen. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass sich als Kernmaterial im vorgestellten Lagenaufbau besonders Textilglasmatten aus Schnittglasfasern mit möglichst kleinem Faserdurchmesser und gleichmäßiger Faserverteilung

eignen. Aus der Vielzahl der möglichen Oberflächenvliese konnten spezielle Vliese aus Glas- oder PAN-Fasern mit Flächengewichten zwischen 50 und 80 g/m<sup>2</sup> identifiziert werden, die sehr wirksam zur Verringerung der Langwelligkeit (z.B. von LW>20 auf LW<10) und der Kurzwelligkeit (z.B. von SW>35 auf SW<15) beitragen.

Die Verfahrensoptimierung fand mit Hilfe statistischer Methoden zur Versuchsplanung und Versuchsauswertung mit dem EP-Harzsystem B2 statt. Nach der Eingrenzung der Einfluss- und Zielgrößen erfolgte die Aufstellung eines „D-optimalen“ Versuchsplans und dessen Durchführung anhand von RTM-Versuchen. Mittels schrittweiser Regression wurde ein Prozessmodell gebildet, welches sowohl das beobachtete Systemverhalten und die auftretende Streuung sehr gut beschreiben konnte.

Es konnte nachgewiesen werden, dass zur Verringerung des Faserdurchzeichnens ein hoher Nachdruck auf das flüssige Matrixmaterial nach der Injektion erforderlich ist, damit ein Teil der Reaktionsschwindung ausgeglichen werden kann. Zu diesem Zweck wurde die Anlagen- und Werkzeugtechnik so modifiziert, dass Drücke von über 100 bar in der Kavität erzeugt werden konnten. Weitere Zusammenhänge wurden zwischen den optimalen Einstellungen von Vakuum und Temperaturdifferenz einerseits und der Werkzeugtemperatur und dem Nachdruck andererseits festgestellt. Die gemeinsame Betrachtung von Aushärtetemperatur und -zeit ergab, dass die beste Oberflächenqualität dann werkzeugfallend erreicht wird, wenn nach Erreichen des Sättigungs-T<sub>g</sub> für die jeweilige Aushärtetemperatur entformt wird. Ein längeres Verweilen im Werkzeug führt weder zu einem höheren T<sub>g</sub> noch zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität. So konnten zwei verschiedene Strategien zur Erzielung hoher Oberflächenqualität identifiziert werden. Die erste führt zu einer hohen Werkzeugtemperatur und sehr kurzen Entformzeiten. Die zweite Strategie mit möglichst niedriger Temperatur und langer Entformzeit ist prozesstechnisch einfacher und daher sicherer.

Zum Vergleich hochreaktiver Harzsysteme und zur Ermittlung der Volumenänderung während des Reaktionsverlaufs wurde eine neuartige Schwindungsmesszelle entwickelt und aufgebaut. Somit wurde die Möglichkeit geschaffen, die Verarbeitungsschwindung in den Anteilen aus chemischer und thermischer Volumenänderung in Abhängigkeit von Harzsystem, Aushärtetemperatur und -zeit zu ermitteln. Das Harzsystem B2 wies die geringsten Schwindungswerte bei gleichzeitig hoher Reaktivität auf. Durch die Labormessungen konnte auch erkannt werden, dass ein Großteil der Reaktionsschwindung sehr schnell stattfindet und dass deshalb der Nachdruck im RTM-Verfahren zur Schwindungskompensation früh auf das Matrixsystem aufgebracht werden muss. Die Aushärtung bei niedrigen Temperaturen führte zu geringen Werten für die chemische und erwartungsgemäß auch für die thermische Schwindung. Die hier neu entwickelte und vorgestellte Methode zur Schwindungsbestimmung liefert im Vergleich zur Literatur plausible Ergebnisse mit hoher Messgenauigkeit erstmals für hochreaktive Harzsysteme.

In der Optimierung der Beschichtungen auf der Bauteiloberfläche konnte bestätigt werden, dass durch Prozessbeschichtungen und nachträgliche Grundierung und Lackierung Oberflächenstrukturen und -defekte vermindert oder ausgeglichen werden können. Von den hier unter-

suchten Prozessbeschichtungen bewiesen die thermoplastischen Folien und die Gel-Coats kurzfristig das größte Potenzial für eine Abdeckung der Faserabzeichnung, da sowohl die EP-Surfacing-Films als auch das IPC zunächst einen höheren Aufwand in der Anpassung der Materialien an das vorliegende RTM-Verfahren bedeuten. Durch Lackierversuche wurde nachgewiesen, dass die nachträgliche Kunststofflackierung bei der Verwendung von abgestimmten Materialien und geeigneter Applikationstechnik zur Verbesserung der Oberflächenqualität beiträgt. Ferner konnten Grundierungen gefunden werden, die ein hohes Abdeckungsvermögen bei gleichzeitig akzeptabler Eigenstruktur haben. Um bei Bedarf die Oberflächenqualität des RTM-Bauteils nachträglich auf das geforderte Niveau anzuheben, wurden zwei wirksame Nacharbeitsmethoden in Form von Zwischenschleifen als „Notfall-Strategie“ identifiziert.

Die erzielten Erkenntnisse aus den Teilsystemen Materialien, RTM-Verfahren und Beschichtungen können mit verschiedenen Aufwandsschwerpunkten zum Gesamtsystem „lackiertes CFK-Bauteil“, das die Anforderungen des entsprechenden Außenhautbereichs erfüllt, kombiniert werden. Anhand von RTM-Musterplatten wurden erstmalig kurzfristige Lösungen für Bauteile im vertikalen Sichtbereich nachgewiesen. Die Class-A-Anforderungen für den horizontalen Außenhautbereich konnten in der vorliegenden Arbeit zum ersten Mal mit Musterteilen im RTM-Verfahren mit hohem prozesstechnischen Aufwand erfüllt werden. Während zu Beginn der systematischen Untersuchungen die Oberflächenwelligkeit noch bei Werten von  $LW > 35$  lag und starke regelmäßige Strukturen aufwies, konnten durch kombinierte Maßnahmen reproduzierbar  $LW$ -Werte  $< 5$  erreicht werden. Die visuelle Beurteilung an lackierten Musterteilen dieser Qualität ergab keine Beanstandung einer gerichteten, regelmäßigen Faserabzeichnung.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Material-Verfahrens-Beschichtungs-Kombinationen gefunden und Entwicklungspotentiale aufgezeigt, mit denen die Class-A-Qualität der automobilen Außenhaut mit Hochleistungs-FKV erreicht werden kann. Dies stellt die grundlegende Voraussetzung für weitere Entwicklungen mit dem Ziel einer Umsetzung in konkreten Bauteilprojekten dar.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Altmann, O.: Karosserie- und Automobilkonzepte mit Polymerwerkstoffen. VDI Berichte 968. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 591-652.
- [2] Applicator System AB, Schweden: P4 - Preforming Technology. o.O. o.J.
- [3] Bader, S.: In-Mould-Coating Outperforms Gel-Coat. Reinforced Plastics (1996) 12, S. 28-30.
- [4] Batzer, H.: Polymere Werkstoffe. Stuttgart: Georg Thieme Verlag 1984, S. 170-185.
- [5] Beckwith, S. W.: RTM, VARTM and SCRIMP Processing Infusion Technologies. SAMPE 44th ISSE / SAMPE '99. Long Beach, CA 1999.
- [6] Bergmann, H. W.: Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1992.
- [7] Bhothe, K. R.: Qualität - Der Weg zur Weltspitze. Institut für Qualitätsmanagement-IQM. Großbottwar 1990.
- [8] Bickerton, S. et al.: Investigation of Draping and its Effects on the Mold Filling Process during Manufacturing of a Compound Curved Composite Part. Composites 28 A (1997), S. 801-816.
- [9] Bigg, D. M., Barry, R. G., Markle, R. A.: In-Mold Coating of Thermoplastic Sheet Composites Using Thermally Reversible Isocyanate Polymers. ANTEC '96, o.O. 1996, S. 2739-2744.
- [10] Bledzki, A. K., Hermann, A.: Einfluss von Verarbeitungsparametern auf Oberflächenfehler bei lackierten SMC-Bauteilen. Plastverarbeiter 46 (1995) 1, S. 26-29.
- [11] BMW Group Standard: GS 97003-1, Oberflächenklassifizierung für lackierte Kraftfahrzeuge / Surface classification for painted motor vehicles, Teile 1-5. München 2000.
- [12] BMW Group Standard: GS 97006, Teile 1 und 2, Ein- und Zweikomponenten-Klarlacke / One and Two Component Clear Coats. München 2000.
- [13] BMW Group Standard: GS 97007, Teile 1 und 2, Pulver-Klarlacke / Powder Clear Coats. München 2000.
- [14] Booß, H. J., Hauschildt, K. R.: Volumenänderung bei der Vernetzung von ungesättigten Polyesterharzen. Kunststoffe 63 (1973) 3, S. 181-185.
- [15] Broge, J.: New Plastics and the Automobile. Automotive Engineering International (2000) 5, S. 70-89.
- [16] Bucher, M. et al.: Latest Developments in RTM- and Thermoforming-Processes for Automotive Applications. 6th European Congress, Lightweight and Small Cars. Cernobbio 1997, S. 157-166.
- [17] Buckley, D. T.: Complex Preforms in Net Shape and High Volumes. 29th International SAMPE Technical Conference. o.O. 1997, S. 1-10.
- [18] Bürkle, E.: Folien Dekoration. Kunststoffe 87 (1997) 3, S. 320-328.

- [19] BYK-Gardner: Gardner Soft, Wave-Scan-plus. (Bedienungsanleitung). o.O. 1996.
- [20] Chang, T., Faison, E.: A Study of the Effects of Process Conditions on the Shrinkage of Plastic Parts in Injection Molding by the Taguchi Method. ANTEC 2000. o.O. 2000, S. 3068-3073.
- [21] Coissac, J.: IMC HPIP - In Mold Coating High Pressure Injection Process. Composites (1994) 4, S. 36-40.
- [22] Corcoran, E.: Pre-Mold Powder Coating for Compression Molded Parts. 1. Internationale AVK-TV Tagung. Baden-Baden 1998, B.12.1-B.12.7.
- [23] Dexter Aerospace Materials Division: Composite Skin Cuts Cost of Jet Parts Production. Reinforced Plastics (1995) 3, S. 14.
- [24] DIN 16 945 - Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen - Prüfverfahren. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1989, S. 1-16.
- [25] DIN 16 946 (Teil 1) - Reaktionsharzformstoffe - Gießharzformstoffe - Prüfverfahren. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1989, S. 1-6.
- [26] DIN 51 757 - Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen - Bestimmung der Dichte. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1994, S. 1-27.
- [27] DIN 53 188 - Anstrichstoffe - Epoxidharze - Prüfung. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1975, S. 1-3.
- [28] DIN 53 479 - Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren - Bestimmung der Dichte. Berlin, Köln: Beuth Verlag 1976, S. 1-4.
- [29] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1998.
- [30] Drummer, D., Wolfrum, G. W., Haldenwanger, H.-G., Reim, H.: Bewitterungsfeste Oberflächenbeschichtungen von Faserverbundbauteilen mit Class-A-Anforderungen. 2. AVK-TV Tagung. Baden-Baden 1999, S. 3-11.
- [31] Dusek, K.: Advances in Polymer Science, Epoxy Resins and Composites IV. Bd. 80. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1986.
- [32] Dyckhoff, J. H.: Resin Transfer Moulding: Beitrag zur Verbesserung der Formteilloberflächenqualität. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung 1995.
- [33] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1992.
- [34] Ellis, B.: Chemistry and Technology of Epoxy Resins. London: Chapman & Hall 1993.
- [35] Ellison, T. M., Shimanski, M. A.: Plastic Film Finishing for Exterior Automotive Components. ANTEC - 45. Annual Conference. Washington DC 1990, S. 788-789.
- [36] Eßwein, G., Kraft, W. W.: Beurteilung der Oberflächen von SMC-Karosserieteilen. Kunststoffe 81 (1991) 12, S. 1119-1122.
- [37] Fischbach, G. B. M.: Prozeßführung beim Spritzgießen härtpbarer Formmassen. Dissertation RWTH Aachen. Aachen 1988.

- [38] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1999.
- [39] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen - Fasern und Matrices. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1995.
- [40] Fong, L., Xu, J., Lee, L. J.: Preforming Analysis of Thermoformable Glass Fiber Mats - Deformation Modes and Reinforcement Characterization. Polymer Composites 15 (1994) 2, S. 134-146.
- [41] Fridley, C. H.: Paint Film Laminate Technology Provides Painted Thermoplastic Parts without VOC Issues. SAE Technical Paper Series (1990) No. 902231.
- [42] Gelin, J. C. et al.: Manufacture of Thin Composite Structures by the RTM Process: Numerical Simulation of the Shaping Operation. Composites Science and Technology 56 (1996), S. 711-718.
- [43] Gerard, J. H., Jander, M.: P4-Technologie: Ein Verfahren zur industriellen Fertigung von Vorformlingen. Owens Corning, Belgien. o.O. o.J.
- [44] Gillham, J. K.: Molecular Design of Thermosetting Systems: Evolution of Properties during Cure in Terms of Transitions. Polymer Composites. International Symposium on Polymer Composites Science and Technology. Quebec City, Canada 1999, S. 183-194.
- [45] Giordano, M. et al.: A Fiber Optic Thermoset Cure Monitoring Sensor. Polymer Composites. International Symposium on Polymer Composites Science and Technology. Quebec City, Canada 1999, S. 235-250.
- [46] Grüneberg, O.: Sind kurzweilige Lackstrukturen vermeidbar? Farbe & Lack 103 (1997) 4, S. 156-159.
- [47] Gupta, V. K., Heaver, T. A., Brown, C. A.: Composite Surfacing. 37th International SAMPE Symposium. Covina 1992.
- [48] Hardt, B., Reinirkens, G.: Verdeckt. Plastverarbeiter 47 (1996) 3, S. 6-66.
- [49] Hartung, M., Hintze-Brüning, H., Osowski, H.-J.: Kunststofflackierung im Überblick. Kunststoffe 89 (1996) 3, S. 350-353.
- [50] Hayward, J. S., Harris, B.: Processing Factors Affecting the Quality of Resin Transfer Moulded Composites. Plastics and Rubber Processing and Applications (1989) 11, S. 191-198.
- [51] Hill, R. R. Jr. et al.: Analysis of Volumetric Changes of Unsaturated Polyester Resins during Curing. Polymer Engineering and Science 35 (1995) 10, S. 852-859.
- [52] Hintermann, M., Kalbermatten, T.: Status und künftige Potentiale durch Faserverbund im RTM-Verfahren. VDI-K-Tagung "Technologien um das 3-Liter-Auto", Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S.181-213.
- [53] Hörsting, K.: Rationalisierung der Fertigung langfaserverstärkter Verbundwerkstoffe durch den Einsatz multiaxialer Gelege. Aachen: Shaker Verlag 1994.
- [54] Humberstone, J.: Raising the Standards for Gel-Coats. Reinforced Plastics (1995) 10, S. 28-31.

- [55] International Standard ISO 3521 - Plastics - Unsaturated Polyester and Epoxy Resins - Determination of Overall Volume Shrinkage. International Organization for Standardization. Genf, CH 1997.
- [56] Jacob, A.: RTM Moves Ahead. Reinforced Plastics (1997) 3, S.26-33.
- [57] Jansen, K., Van Dijk, D., Husselman, M.: Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding. Polymer Engineering and Science 38 (1998) 5, S. 838-846.
- [58] Jaskoia, A., Noppe, C.: Integration von Kunststoff-Bauteilen in BMW-Fahrzeugglackiere-reien (Szenarien und Anforderungen). Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S.191-199.
- [59] Jeffs, D.: Low Profile Fillers for Automotive BMC and SMC. Reinforced Plastics (1994) 6, S. 32-35.
- [60] Johannsen, J., Schmitt, L.: Gezielte Risikominimierung durch kombinierten Methodenein-satz. BMW AG Qualitätssicherung. München 1995.
- [61] Jussila, J., Laitila, J., Pasanen, S.: The Effect of Binder on Mechanical Properties of Composites. Composites and Sandwich Structures. Stockholm 1997, S. 363-371.
- [62] Karbhari, V. M., Slotte, S. G., Steenkamer, D. A., Wilkins, D. J.: Effect of Material, Process and Equipment Variables on the Performance of Resin Transfer Moulded Parts. Composites Manufacturing 3 (1992) 3, S. 143-152.
- [63] Karkanias, P. I., Partridge, I. K.: Modelling the Cure of a Commercial Epoxy Resin for Applications in Resin Transfer Moulding. Polymer International 41 (1996), S. 183-191.
- [64] Kendall, K. N. et al.: Characterization of the Resin Transfer Process. Composites Manu-facturing 3 (1992) 4, S. 235-249.
- [65] Kendall, K. N., Rudd, C. D.: Flow and Cure Phenomena in Liquid Composite Molding. Polymer Composites 15 (1994) 5, S. 334-348.
- [66] Kinkelaar, M., Muzumdar, S., Lee, L. J.: Dilatometric Study of Low Profile Unsaturated Polyester Resins. Polymer Engineering and Science 35 (1995) 10, S. 823-836.
- [67] Kittelson, J. L., Hackett, S. C.: Tackifier / Resin Compatibility is Essential for Aerospace Grade Resin Transfer Molding. 3M Aerospace. St. Paul 1994.
- [68] Kötte, R.: Der Resin-Transfer-Molding-Prozeß: Analyse eines Harzinjektionsverfahrens. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1991.
- [69] Korotkov, V., Chekanov, Y., Rozenberg, B.: Shrinkage Defect Modelling in Thermoset Composites. ICCM-10. Bd. 3. Canada, o.O. 1995, S. 165-171.
- [70] Kranbuehl, D. E., Kingsley, P., Hart, S.: In Situ Sensor Monitoring and Intelligent Control of the Resin Transfer Molding Process. Polymer Composites 15 (1994) 4, S. 299-305.
- [71] Kraus, R.: Die PKW-Lackierung: Anforderungen an die Lackmaterialien und den Lackier-prozeß, Istzustand und Trends im Bereich der Oberflächentechnik. Kunststoffe im Auto-mobilbau. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S. 21-29.
- [72] Krotzmaier, J.: Versuchsplanung: Der Weg zur Qualität des Jahres 2000. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1990.

- [73] Laible, R., Maier, W.: Neue Entwicklungen bei der Lackierung von flexiblen Karosserie-Anbauteilen. Lackierung von Kunststoffen. Deutsche Forschungsgesellschaft für Ober-flächenbehandlung. Köln 1986, S. 192-203.
- [74] Lampe, T. et al.: Emotionen wecken durch edle Oberflächen. Kunststoffe im Automobil-bau. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S. 139-164.
- [75] Lange, J., Toll, S., Manson, J., Hult, A.: Residual Stress Build-Up in Thermoset Films Cured below their Ultimate Glass Transition Temperature. Polymer 38 (1997) 4, S. 809-815.
- [76] Lebrun, G., Gauvin, R., Kendall, K. N.: Experimental Investigation of Resin Temperature and Pressure during Filling and Curing in a Flat Steel RTM Mould. Composites 27A (1996), S. 347-355.
- [77] Leonhard Kurz GmbH & Co.: Heißprägeverfahren und IMD-Technik - wirtschaftliche Alternativen für die Dekoration von technischen Kunststoffteilen. o.O. 1992.
- [78] Li, W., Lee, L.: Shrinkage Control of Low-Profile Unsaturated Polyester Resin Cured at Low Temperature. Polymer 39 (1998) 23, S. 5677-5687.
- [79] Liu, C. J. et al.: The Effect of the Addition of a Low Profile Additive on the Curing Shrinkage of an Unsaturated Polyester Resin. Polymer Engineering and Science 39 (1999) 1, S. 18-25.
- [80] Long, A. C. et al.: Fibre Movements and Associated Property Changes during Preform Manufacture. Advanced Composites, Proceedings of the 11th Annual ESD. Dearborn, USA 1995, S. 263-273.
- [81] Long, A. C., Rudd, C. D., Middleton, V.: Modeling the Deformation of Thermoformable Random Fiber Reinforcements during Preform Manufacture. Polymer Composites 17 (1996) 3, S. 321-331.
- [82] Lundström, T. S., Gebart, B. R.: Influence from Process Parameters on Void Formation in Resin Transfer Molding. Polymer Composites 15 (1994) 1, S. 25-33.
- [83] Manderscheid, A.: Neue Entwicklungen in der RTM- und S-RIM-Fertigungstechnologie. 25. Internationale AVK Tagung. Berlin 1993, B.9.1-B.9.5.
- [84] Marsh, G.: GRP Meets the Jet Ski Challenge. Reinforced Plastics (1997) 12, S. 34-38.
- [85] McBain, D., Straus, E., Wilczek, F.: Advances in In-Mould Coatings. Reinforced Plastics (1997) 5, S. 34-40.
- [86] Michaeli, W., Fleischer, D.: Advanced Processing Technology for Improving the Surface Quality of S-RIM Components. Composites 27 A (1996), S. 307-310.
- [87] Michaeli, W., Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1989.
- [88] Möller, F.: Materialmodellierung für die Umformsimulation gewebeverstärkter thermo-plastischer Halbzeuge. Dissertation Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern 1998.
- [89] Motahhari, S., Cameron, J.: The Contribution to Residual Stress by Differential Resin Shrinkage. Journal of Reinforced Plastics and Composites 18 (1999) 11, S. 1011-1020.

- [90] Mouritz, A. P., Leong, K. H., Herszberg, I.: A Review of the Effect of Stitching on the In-Plane Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Composites* 28 A (1997), S. 979-991.
- [91] Neitzel, M., Blinzler, M., Edelmann, K., Hoecker, F.: Surface Quality Improvements in Textile-Reinforced Thermoplastics. *Polymer Composites, International Symposium on Polymer Composites, Science and Technology. Quebec City, Canada 1999*, S. 65-75.
- [92] N.N.: PVC-Based Decorative Films Provide Class-A Finish for Automotive Parts. *Modern Plastics International* (1997) 7, S. 81.
- [93] N.N.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. 3. Auflage. *Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA). Frankfurt am Main 1996*.
- [94] N.N.: Um die Hälfte leichter. *Automobil-Entwicklung* (2001) 1, S. 78-79.
- [95] Nowacki, J., Neitzel, M.: Fahrzeugaußenteile aus Organoblechen. *Kunststoffe* 87 (1997) 9, S. 1154-1156.
- [96] Obering, G. W.: Lackierte Kunststoffteile der Automobilindustrie, Wechselwirkung zwischen Träger- und Beschichtungswerkstoff. *Lackierung von Kunststoffen. Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung. Köln 1986*, S. 15-39.
- [97] Osterhold, M., Armbruster, K.: Die Oberflächenstruktur von Lacken. *Farbe & Lack* 103 (1997) 10, S. 63-68.
- [98] Palmqvist, A.: Rational RTM Manufacturing. 48th Annual Conference. *Composite Institute / The Society of the Plastics Industry. o.O. 1993*, S. 3D/1-3D/6.
- [99] Parish, D.: Looking Good with Less Effort. *Reinforced Plastics* (1996) 10, S. 56-58.
- [100] Pfestdorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngößen in der Umformtechnik. *Bamberg: Meisenbach Verlag 1997*.
- [101] Piggott, M. R., Zhang, X.-D.: Shrinkage Control in Fibre Reinforced Polymers II: Epoxy Resins with Expanding Monomers. *Polymers & Polymer Composites* 3 (1995) 5, S. 361-368.
- [102] Piggott, M. R., Zhou, W.: Shrinkage Control in Fibre Reinforced Polymers III: Carbon Fibre Reinforced Polyesters with Expanding Monomers and Low Profile Additives. *Polymers & Polymer Composites* 3 (1995) 6, S. 395-402.
- [103] Potter, K.: *Resin Transfer Moulding. London: Chapman & Hall 1997*.
- [104] Rohatgi, V., Lee, L. J.: Moldability of Tackified Fiber Preforms in Liquid Composite Molding. *Journal of Composite Materials* 31 (1997) 7, S. 720-734.
- [105] Roth, E.: *Schwindung von ungesättigten Polyesterharzen. Dissertation RWTH Aachen. Aachen 1977*.
- [106] Rudd, C. D., Kendall, K. N.: Thermo-Mechanical Effects during Resin Transfer Moulding. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications* (1994) 22, S. 223-233.
- [107] Rudd, C. D., Long, A. C., Kendall, K. N., Mangin, C. G. E.: *Liquid Moulding Technologies. Cambridge, England: Woodhead Publishing 1997*.

- [108] Rudd, C. D., Middleton, V., Owen, M. J., Long, A. C., McGeehin, P.: Design, Processing and Performance of Structural Preforms Materials and Manufacturing Processes (1995) 1, S. 89-102.
- [109] Sanfeliz, J., Murthy, P., Chamis, C.: Computational Simulation of Surface Waviness in Graphite/Epoxy Woven Composites due to Initial Curing. 37th International SAMPE Symposium. *Covina 1992*, S. 1-14.
- [110] Schick, P.: *Systemoptimierung - Parametrische Systemauslegung durch geplante Versuche. 2. Auflage. BMW AG Qualitätssicherung. München 1989*.
- [111] Schmidt, T. W.: *Zur Abschätzung der Schwindung. Dissertation RWTH Aachen. Aachen 1986*.
- [112] Seefried, J.: *SMC-Außenhautteile in Class-A. SMC Automotive / DaimlerChrysler. Sindelfingen 1998*.
- [113] *Shell Chemicals: The Long and the Short of Epoxy Resins. o.O. 1992*.
- [114] Stark, W., Döring, J., Walentowski, H.-U.: Vernetzen statt Verglasen. *Kunststoffe* 90 (2000) 4, S. 90-92.
- [115] Steenkamer, D. A., Wilkins, D. J., Karbhari, V. M.: The Influence of Preform Joints on the Processing of RTM Composites. *Composites Manufacturing* (1995) 6, S. 23-34.
- [116] Theriault, R., Wolfrum, J., Ehrenstein, G.: Härungsverlauf von Harzsystemen. *Kunststoffe* 89 (1999) 11, S. 112-116.
- [117] Vaccarella, P. W., Williams, P. R., Tsai, J.: New Low Profile Resin Transfer Moulding Resin for Automotive Body Panels. 48th Annual Conference. *Composite Institute / The Society of the Plastics Industry. o.O. 1993*.
- [118] Vogel, R., Davey, M.: Low Volume Composites Moulding with the RTM Process. Annual Conference of Institute of Metals and Materials Australasia, the Materials Society of IEA. *Melbourne, Australia 1991*, S. 181-184.
- [119] Wacker, G.: *Experimentell gestützte Identifikation ausgewählter Eigenschaften glasfaserverstärkter Epoxidharze unter Berücksichtigung der Grenzschicht. Kassel: Shaker Verlag 1996*.
- [120] Weimer, C., Mitschang, P., Neitzel, M.: Optimierte Nähmaschinenteknik zur Konfektionierung von textilen Verstärkungsstrukturen. 10th International Symposium for Technical Textile, Nonwovens and Textile Reinforced Materials. *Frankfurt 1999*, S. 1-7.
- [121] Wember, T.: *Cornerstone - Einführungskurs in das Auswertungssystem Cornerstone. Waltrop 2000*.
- [122] Wember, T.: *Technische Statistik und statistische Versuchsplanung. Waltrop 2000*.
- [123] Weyrauch, D.: *Herstellung dreidimensional vorgeformter Faserstrukturen auf der Basis von Textilglasmatten für den Einsatz im Harzinjektionsverfahren. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung 1993*.
- [124] Wilke, G.: *Lackieren von Kunststoffanbauteilen. Kunststoffe* 89 (1999) 3, S. 89-94.

- [125] Wilke, G., Weintz, H.-J., Mayer, B.: Die Lackierung von Kfz-Anbauteilen mit wäßrigen Lacksystemen. Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S. 18-189.
- [126] Yang, H., Lee, L. J.: Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins in Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding - SCRIMP. ANTEC '99. o.O. 1999, S. 2686-2690.
- [127] Zorll, U., Schütze, E.: Kunststoffe in der Oberflächentechnik. Stuttgart: Kohlhammer 1986.

## 11 Anhang

### 11.1 Anhang A: Außenhautanforderungen am Beispiel der Frontklappe

Anforderung	Richtlinien / Normen / Gesetze	Horizontale dekorative Außenhaut-Bauteile
		Frontklappe (Motorhaube)
Steifigkeit	Fahrzeug- und bauteilabhängig, keine generelle Festlegung, individuelle Prüfvorschriften	Beulsteifigkeit für Eindrückversuche im Emblemereich und höchste Windlasten im vorderen Drittel, Steifigkeit für Dichtungskräfte, Torsionssteifigkeit, Missbrauchslastfälle
Festigkeit	Internationale gesetzliche Anforderungen zu Frontal-, Seiten- und Heckcrash	Frontalaufprall z.B. nach FMVSS 208; Insbes. Anforderung an Schlossanbindung und Schamiere; Forderungen: keine Loslösung der Teile, keine Intrusion in Scheibenbereich
Oberflächenqualität, Lackqualität	BMW N 60165.0 T1 und T2 (Oberflächenklassifizierung und -prüfung), T3 bis T11 für versch. Fahrzeugtypen	Bewertungszone A' (höchste Anforderungen): Kurzwelligkeit <35, Langwelligkeit <8, Glanz >80, Oberflächenstruktur vergleichbar mit angrenzenden Teilen, keine Lackfehler, Farbtongleichheit mit angrenzenden Teilen...
Bewitterung, Korrosion, Dauergebrauch	BMW N 60091.0 T33 (Lackierung von Kunststoffteilen), BMW N 60092.0 T2 (Prüfung von Lacksystemen)	Gitterschnittprüfung (Kratzfestigkeit, Lackhaftung), Rissbeständigkeit, Alterungsbeständigkeit, Steinschlagprüfung, Kältebeständigkeit (-30°C), Temperaturwechseltest (Zyklen von -30°C bis 90°C), Feuchte-/Kältebeständigkeit, Bewitterungsbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit
Wärmeformbeständigkeit	Sonnensimulation nach PrV 306.3c; Klimawechseltest nach PrV 303.3d; zusätzlich Temperaturanforderungen	Bis zu 130°C (Sonneneinstrahlung und gleichzeitig Stauwärme vom Motor); Sonnensimulation mit Bestrahlung >1000 W/m <sup>2</sup> mit ca. 85°C max. Bauteiltemperatur, Zyklen von -30°C bis 45°C Umgebungstemperatur und Klimakammerfeuchte von <20% bis >80%, Prüfdauer mind. 18 Tage; Klimawechseltest mit Zyklen von -30°C bis 95°C und Feuchte von 15% bis 85%, Prüfdauer mind. 9 Tage



Anforderung	Richtlinien / Normen / Gesetze	Frontklappe (Motorhaube)
Längenausdehnung	Ausdehnung gemessen von -30 bis 85°C	Sehr kritisch wegen Bauteilgröße und Klappenfunktion, design-, bauteil-, fahrzeugabhängig, abhängig von Anbindungskonzept: insbes. bei RT konstante Fugen
Duktilität, Schlagzähigkeit, Schadenstoleranz	Bagatellschäden nach ECE-R42, US-Part 581, IIHS-Bumper-Test, CU-Bumper-Test; zusätzliche BMW-Anforderung nach CMVSS125 (Can.)	Keine Schäden bei 4 km/h (z.B. ECE-R42); zusätzliche Forderung für BMW-Fahrzeuge: auch keine Schäden bis 8 km/h (Can.); evtl. zusätzliches Potenzial bei Kunststoffen für z.B. Hagelschäden
Reparierbarkeit, Reparaturkonzepte	AZT-Crash zur Kaskoeinstufung, Front- und Heckcrash offset mit v=15 km/h; Reparaturaufwand nach EHB EG-4 Nr. 39, 60, 73	Bei AZT-Crash keine Schäden und damit keine Reparaturkosten
Bruchverhalten, Spaltverhalten bei Crash	Keine Normen vorhanden! Fahrzeugspezifische Sicherheitskonzepte; Anforderungen aus Insassen- und Partnerschutz	Frontalaufprall z.B. nach FMVSS 208
		Lastenheft Gesamtfahrzeug oder Anforderungskatalog Gesamtfahrzeug (generelle Anforderungen): Kein Teileflug, d.h. keine Lösung von Bauteilen vom Fahrzeug; Brüche und Risse sind in bestimmten Bereichen tolerierbar, allerdings keine scharfen Kanten oder spießartige Brüche im Insassenraum; Klappen und Türen müssen bei allen Crashtests geschlossen bleiben, Türen danach noch funktionsfähig sein
Fußgängerschutz, Verformbarkeit	EEVC WG 10 Pedestrian Protection (geplant), Ergänzung Richtlinie 74/483 EWG	Head-Bonnet Impact Test (Kind/Erw.) v=40km/h, m=2,5/4,8kg, HIC <1000; Femur-Leading Edge v=20-40km/h

## 11.2 Anhang B: Beispiele für Außenhautbauteile aus der Marktanalyse

Nr.	Bauteil	Fahrzeughersteller, Modell, Jahr	Fertigungsverfahren, Stückzahl	Faserverstärkung, Matrixsystem	Oberflächen
A1	Außenhaut (Türen, Türblätter, Seitenwände, Frontklappe, Heckklappe)	Micro Compact Car (MCC), SMART, 1998	TP-Spritzgießen, Taktzeit 1,7min (→100.000 pa)	Unverstärkt, XENYO (PC / PBT) XD 1573 von General Electrics Plastics	Class A (lackierfähig), durchgefärbte TP, off-line Klarlackiert
A2	Heckklappe (Außenhaut)	MERCEDES, A-KLASSE, 1997	TP-Spritzgießen (auf Trägerteil GMT-PP40GF mit 2K-PUR Kleber)	Unverstärkt, NORYL GTX 964 Nylon/Polyphenyle noxid-Blend (PA/PPO)	Off-Line-Lackierung extern (Qualitäts-Probleme bei Klimawechsel)
A3	Seitenwände vorne	MERCEDES, A-KLASSE, 1997	TP-Spritzgießen	Unverstärkt, NORYL GTX 964 Nylon/Polyphenyle noxid-Blend (PA/PPO) von GEP	Primern bei 140°C, In-Line-Lackierung nach KTL, Lacktrocknung bei 145°C, Class A
A4	Seitenwände vorne / hinten	BUICK, Oldsmobile, Cadillac, Pontiac, Saturn u.v.m.	TP-Spritzgießen	Unverstärkt, NORYL GTX 917 PA/PPO-Blend von GEP	
A5	Karosserie (4 Teile + 4 Türen + 2 Klappen)	CHRYSLER, CCV Composite Concept Vehicle, 1996	TP-Spritzgießen (Gasinnendruck-Spritzguss), Konzeptstudie (geplant 100.000 pa), Taktzeit 3 min für Spritzgießen	Glasfaser, Polyethylen-terephthalat (PET), Polyester-TP, von TICONA	Rauhe, matte Oberfläche, kein Class A-Anspruch, durchgefärbt, nicht lackiert
A6	Karosserie-Außenhaut	HOTZEN-BLITZ, (Elektroauto)	TP-Coextrudieren und Thermoformen (Tiefziehen)	Unverstärkt, AM50 SOLAR PMMA/ABS-Verbundplatten von SENOPLAST	Class A ? durch gefärbte PMMA-Außenschicht
A7	Stoßfänger, Schwellerabdeckg.	BMW, 3er, 2000	TP-Spritzgießen, z.B. 320.000 pa (E46/4), ca. 70sec	Unverstärkt	
A8	Seitenwand vorne	DAIMLER CHRYSLER, CL500, CL600, 2000	TP-Spritzgießen	Unverstärkt	

Nr.	Bauteil	Fahrzeughersteller, Modell, Jahr	Fertigungsverfahren, Stückzahl	Faserverstärkung, Matrixsystem	Oberflächen
B1	Heckklappe (3-teilig)	CITROEN, XANTIA, 1993	BMC-Spritzgießen, (BT-Masse 15 kg), „IM-BMC“, 1200 pd möglich (→288.000 pa)	Glasfaser, kurz, 18%, Owens-Corning „R63 SX3“, DISITRON 270 S von ALUSUISSE IT	LPA von UNION CARBIDE
B2	Große Motorhaube (2-teilig)	ALFA ROMEO, 916 GTV, 916 SPIDER, 1995	Kneaded Moulding Compound (KMC), Injection Compr. Moulding, Masse 25kg	Glasfaser, kurz, UP-Harz	HP-IMC, On-Line-Lackierung, WZ von RANGER
B3	Motorhaube, Dach, Heckklappe	PONTIAC, GENERAL MOTORS, FIERO 1986 (seit 84)	SMC, 65.000 pa (100.000 pa geplant)	Glasfasern 28%, Continuous, UP-Harz	Class A, IMC im Prozess
B4	Karosserie-Außenhaut (Seitenwände, Türen, Heckklappe, Dach, Leisten)	RENAULT, ESPACE (3. Generation), seit 1990	SMC (2,5mm), Taktzeit ca. 2min, 350 pd, ca 80.000 pa	Glasfaser, 28%, L=20-50mm, UP-Harz	Kein IMC, Primer, Schleifarbeit, Lack bei 120° für 20 min
B5	Heckklappe, Verdeckklappe	RENAULT, MEGANE CABRIO, <1997	SMC, (2-schalige Teile mit 2K-PUR-Kleber auf Primer verklebt), 40.000 pa	Glasfaser, kurz, UP-Harz	Class A, on-line-Lackierung nach Grundierung
B6	Frontklappe	ISUZU, LKW 4to <1997	Low-Density(LD)-SMC, DUROLITE von DSM, mit Mikrohohlglaskugeln, 36.000 pa	Glasfaser-Häcksel, Mikroglaskugeln, UP-Harz für SMC und HP-IMC (300-400 bar)	Class A durch HP-IMC, Stahl-Wzge, ATC-Schicht, 2K-Acrylat-Lack
B7	Frontklappe	FORD, Mustang, Mark VIII, Windstar, Aerostar, Econoline	SMC, Plan1997:180.000 pa, 30.000 pa, 240.000 pa, 102.000 pa, 200.000 pa	Glasfaser, kurz	On-Line-Lackierung
B8	Frontklappe, Türen, Dach, Heckklappe, Schwellerverkleidg.	GENERAL MOTORS, EV1 1997	Low-Density SMC, Konzeptstudie, geplant 2.000 pa	Glasfaser, kurz, Dbl-Lte-SMC mit 1,3 g/cm <sup>3</sup> mit Hohlglaskugeln	
B9	Heckklappe	DAIMLER CHRYSLER, CL500, CL600 2000	SMC	Glasfaser, kurz	
C1	Stoßfänger vorne, Radhäuser, Seitenwände hinten	GENERAL MOTORS, IMPACT Elektrofahrzeug, 1994	RIM, Prototypen-Reihe, 50 Stück	SPECTRIM HF 85 von DOW, Polyurethan (PUR), mit 5% RIM-Recyclat, Mica Filler	
C2	Frontend, Heckverkleidung	GENERAL MOTORS, IMPACT Elektrofahrzeug, 1994	RIM, Prototypen-Reihe, 50 Stück	SPECTRIM HP 30 von DOW, Polyurethan (PUR), mit 10% RIM-Recyclat, Mica Filler	
C3	Seitenwände vorne + hinten, Frontend, Türen	PONTIAC, GM, FIERO 1986 (seit 84)	PUR- RRIM, 65.000 pa (100.000 pa geplant)	Polyurethan (PUR)	
C4	Karosserie-Außenhaut, obere und untere Hälften	LOTUS DELOREAN, ELITE, 1974-81	S-RIM, VARI, ca. 3.000 pa (30.000 pa Ziel)	Glasfaser, Wirrfasermatten	Class A, hoher Schleifaufwand!

Nr.	Bauteil	Fahrzeughersteller, Modell, Jahr	Fertigungsverfahren, Stückzahl	Faserverstärkung, Matrixsystem	Oberflächen
D1	Karosserie-Außenhaut (Dach, Türen, Seitenwände vorne + hinten),	DODGE / CHRYSLER, VIPER mit Modellüberarbeitungen, 1990-2000	RTM (FKL zuerst auch in RTM, jetzt SMC), Plan 1997: 2.200 pa, derzeit 15 pd, 3000 pa, Zykluszeit 14-17 min, Ziel 6min	Glasfasermatten, 25-30% CSM Certainteed von Vetrotex, MODAR 824 LTS (LPA) von Ashland, EpoxyAcrylic Resin	Class A mit Gelcoat, Filler und hohem Schleifaufwand Lackierung: AKZO
D2	Heckspoiler	FORD, FIESTA <1996	RTM (ICS Injection Compress. Sotira), Faserpreforming mit PUR-Schaumkern (110 kg/m <sup>3</sup> ), 850 pd (→204.000pa), max. 1600 pd	Glasfasermatten von VETROTTEX, CFM Unifilo U750-375 und 2 Lagen Oberflächenvlies, LP-UP-Harz	Class A nach Lackierung, verchromtes Stahlwerkzeug (3fach-Formmulde), Primer, Lack 80°C
D3	Karosserie-Außenhaut-Teile	JAGUAR, SPORT XJ 220	RTM Faser-Preforming mit PE-Binder	Glasfasermatten Conformat N751 von FIBRMAT, AROTRAN 1562-8 von ASHLAND	Class A, kein Faser-durchzeichnen, Monofilament-Oberflächenschicht
D4	Fahrerhauskabine, 8-teilig, (z.B. Türen, Türrahmen; Masse 86 kg)	MERCEDES, CITYMOG UX-1 1995	RTM (BT-Dicke 19mm), 1000 - 3000 pa, 10.000 Fzge über Laufzeit	Kohlefaser, 60% von TENAX, (4 Lagen Gewebe + 1 Lage Oberflächenvlies), Epoxy (EP)	Unter Class A, akzeptabel für NFZ, OF-Vlies, Al-WZ, Lackierung bei Fa. Weiss
D5	5- (bzw. 7-) teilige Karosserie incl. Aussenhaut, CO3 Composite Body Concept	PSA PEUGEOT CITROEN, TULIP 1993	RTM, Faser-Preforming auf Schaumkern (PUR) mit TP-Binder, Sandwich-Bauteile, verklebt, Konzept, Taktzeiten ca. 10min. (→22.000 pa)	Glasfaser, Wirrfasermatten, 40% Boden, 30% rest. Teile, Polyester	Teile durchgefärbt, Class A durch Preformmaterial (Rovicore) aus WirrfM+TP-Vlies von CHOMARAT (FR)
D6	Frontklappe, Heckklappe, Verdeckklappe	BMW, Z1 1986	RTM-Sandwich mit PUR- Schaumkernen, Ca 1.200 pa	Glasgewebe, Epoxy (EP) von DOW	Class A mit Oberflächenvliesen und Schleifarbeiten
D7	Karosserie-Außenhaut (2mm)	LOTUS, ELAN 1990 (ELISE 1996)	VARI (Vacuum Assisted Resin Injection), Fiberform-Preformprozess, mit TP-Binder, max. 3.000 pa	Glasfasermatten (Preforms), AROTRAN (LP), zero shrinkage, von ASHLAND Härtetemp. 65°C	Class A, IMC vor Preform-Einlegen, WZ mit 2mm Ni-Schicht, hoher Schleifaufwand!
D8	Motorhaube, Heckklappe, Seitenwände	ASTON MARTIN, DB 7 1994	RTM (ICS Injection Compression Sotira) mit Schaumkern, Faser-Preforming, 5 pd (Taktzeit ca 4 min mit ICS) (→1.200 pa), bisher ca. 3000 E	Glasfaser, Unifilo CFM von VETROTTEX, High-Pressure-Schaumkern (100kg/m <sup>3</sup> ), LP-Polyester	Class A aus WZ lt. SORA ohne Gelcoat, verchromtes Stahl-WZ, tatsächlicher Nacharbeitsaufwand hoch
D9	Heckspoilerdeckel mit Spaltflügel	PORSCHE, 911 Turbo, 1999	SMC-Innenstruktur, RTM-Außenschale, Spaltflügel als RTM-Sandwich, 4.000 pa (geplant 2.500 pa), Zykluszeit 15-25min	Glasfasermatten (CFM), Epoxy (EP)	WZ aus Stahl, aufwendige Klappschieber für Außenhaut, Lackierung in KS-Wagenfarbe

Nr.	Bauteil	Fahrzeughersteller, Modell, Jahr	Fertigungsverfahren, Stückzahl	Faserverstärkung, Matrixsystem	Oberflächen
D10	Karosserie-Außenhaut (2mm)	LOTUS, ELISE, 1996	VARI (Vacuum Assisted Resin Injection), Fiberform-Preformprozess, mit TP-Binder, Ziel 2.000 pa, (max. 3.000 pa), d.h. 12 pd	Preforms aus Glasfasermatten, -gelege, -gewebe, AROTRAN PE(LP), zero shrinkage, von ASHLAND Härte-temp. 65°C	IMC vor Einlegen, WZ mit 2mm Ni-Schicht, Class A mit hohem Schleifaufwand
D11	Karosserie-Außenhaut (bis auf wenige Ausnahmen)	OPEL / GM, SPEEDSTER, SOP 8/2000	RTM etwa wie bei Lotus Elise (ansonsten SMC), ca. 2000 pa	Preforms aus Glasfasermatten, -gelege, -gewebe	Manuelles Schleifen
D12	Fahrerhauskabine, (z.B. Türen, Türrahmen)	DAIMLER CHRYSLER, CITYMOG, 4/2000	RTM, (ca. 5000 pa) Zykluszeit nicht unter 45min	Glasfaser- und Kohlefasergelege, -gewebe, Epoxy (EP)	Unter Class A, für NFZ i.O., OF-Vlies, manuelle Nacharbeit
D13	Hochdach, Dachspoiler, Windabweiser, Seitenverkleidung	DAIMLER CHRYSLER, ACTROS (LKW), 1999	RTM-Sandwich mit PU-Schaumkern, Hochdruck-verfahren mit Hennecke-Anlage, 87 pd, -> 20.000 pa alle Varianten ca. 50.000 pa	Preforms aus Glasfasermatten, Epoxy (EP)	
D14	Hochdächer, Dachspoiler, Windabweiser, Motorhauben, Stoßfänger, Frontmodule	FORD Brazil, IVECO China, LEYLAND Indien, versch. LKW-Modelle	RTM-Sandwich mit PU-Schaumkern, oder RTM monolithisch, teilweise mit Multiple Insert Tooling, bis zu 30min	Preforms aus Glasfasermatten, teilw. Handbeschnitt, meist Polyester (PE)	Nur für Nutzfahrzeuge akzeptabel, asiatische Märkte
E1	Karosserie-Außenhaut	CALLAWAY, C12 (Supersportwagen), 1999	Handlaminieren I, Studie mit Produktionsaussichten ca. 100 pa	Kohlenstofffaser-gewebe, Stoßkanten!, Harz transparent eingefärbt (blau)	CFK-Optik mit sichtbarem Gewebe, blau gefärbtes Harz, Klarlack
E2	Karosserie-Außenhaut (und komplette Struktur)	ZATO, L3 Leichtbau-Roadster, seit 1997	Vakuumverfahren Teilweise Sandwich, Kleinstserie 30-40 pa	Kohlenstofffaser-gewebe, -gelege, Kevlar für Energieaufnahme	Teilweise CFK-Optik
E3	Karosserie-Außenhaut (und komplette Struktur)	MCLAREN, F1 (Supersportwagen), 1994-97	Handlaminieren und Vakuumverfahren, teilweise Sandwich mit Nomex-Waben, 100 Fzge. von 94-97	Kohlenstofffaser-gelege	
E4	Karosserie-Außenhaut (und komplette Struktur)	ZONDA, C12 (Supersportwagen)	Handlaminieren mit Autoklaven, Sonderserie 25 Fzge pa	Kohlenstofffaser-gelege	

## 11.3 Anhang C: Verfahrensvarianten und -abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Erklärung
BMC	Bulk Moulding Compound	Spritzgießverfahren mit kurzfaserverst. Formmasse, UP-Harze, Glasfasern mit L<2-5mm
IM-BMC	Injection Moulded BMC	
TMC	Thick Moulding Compound	Verfahren von PREMIX, CRAY VALLEY
DMC	Dough Moulding Compound	„Teig“-Umform-Verfahren
PMC	Polyester Moulding Compound	
KMC	Kneaded Moulding Compound	Verfahren zwischen BMC und SMC
MCM	Melt Compression Moulding	Strangablegeverfahren, anschl. Pressen, DIEFFENBACHER
SMC	Sheet Moulding Compound	Pressverfahren mit flächiger fließfähiger Formmasse, (Harzmatte, Prepreg), (Pressdruck 40-100 bar)
R-SMC	Random SMC	SMC mit regelloser Faserorientierung, Kurzfasern
C-SMC	Continuous SMC	zusätzlich endlose, orientierte Faserverstärkung
LPSC	Low Pressure / Low Profile SMC	SMC mit geringen Drücken, (typ. 5-10 bar),
LD-SMC	Low Density SMC	oder SMC mit geringer Schwindung
HSMC	High Strength SMC	SMC mit 1,3 bis 1,6g/cm <sup>3</sup> Dichte, (mit Füllstoffen)
HMC	High Modulus SMC	bis 25mm Faserlängen, auch UD-Faserverstärkung
H-SMC		Hochmodul-SMC, Variante von DSM
XMC	High Performance Moulding Compound, Kreuzgelege Prepreg	Hochleistungs-SMC, kontinuierliche Verstärkung mit Kreuzgelegen
ZMC		SMC-Variante
CMC		SMC-Variante
HPC	High Performance Compound	SMC mit v=50-60%, z.T. UD-od. Wirrfasern, MENZOLIT
MCS	Mouldable Composite Sheet	SMC von DUPONT (s.u.)
AMC	Advanced Moulding Compound	SMC-Variante mit Lang- bzw. Endlosfasern
A-SMC		
VESMC	Vinylester SMC	
VAM	Vacuum Assisted Moulding	SMC mit Vakuumunterstützung
MCM	Melt Compression Moulding	Strangablegeverfahren, anchl. Pressen, DIEFFENBACHER
CF-SMC	Carbon Fiber SMC	SMC mit Kohlefaserverstärkung
Adv.SMC	Advanced SMC	SMC mit C-Faser, v=40-60%, random + continuous
WMC	Woven Moulding Compound	SMC mit Gewebe abgedeckt, bis zu 50% höhere Festigkeit
PFC	Preform-Compound	Gewebe-Preform mit Hybridmatrix, TP-Umformen, UV-Polymerisation, anschließend Verpressen mit LP-SMC
RTM	Resin Transfer Moulding	Harzinjektionsverfahren, Harz/Härter-Gemisch wird mit Druck (typ.<7bar) in geschlossene Form gespritzt
HSRTM	High Speed RTM	RTM mit schnellhärtendem Matrixsystem
SRTM	Structural RTM	Faser-Preform, Einlegen, anschl. Injektion
CRTM	Continuous RTM	Kontinuierlicher Prozess von HEXCEL
PI	Pressure Injection	RTM-Typ, Einspritzen mit Druck von Punkten aus
LPRTM	Low Profile RTM	RTM mit Low Profile Matrixsystem (geringer Schwund)
VRTM	Vacuum RTM	Vakuumunterstützung, von TEXAS INSTRUMENTS
VARTM	Vacuum Assisted RTM	Vakuum-Druck-Injektionsverfahren, von HARDCORE
VARI	Vacuum Assisted Resin Injection	Vakuum-Druck-Injektionsverfahren, von LOTUS
VIS	Vacuum Injection System	Harz/Härter wird mit Vakuum in Form gebracht (DSM)
RIFT	Resin Infusion under Flexible Tooling	Vakuumsackverfahren von CIBA-GEIGY
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Manufacturing Process	Vakuumsackverfahren mit Verteilergewebeschild, auch für sehr große Teile, von SEAMANN

DPRTM FRTM	Differential Pressure RTM Flexible RTM	Vakuumsackverfahren im Autoklaven mit Außendruck Diaphragmaverfahren, flächiges Matrixhalbzeug und Faserhalbzeug zwischen zwei Diaphragmen
RFI, RFIP	Resin Film Infusion (Process)	RTM-Typ, eine Formhälfte, Vakuumsack (bzw. Diaphragma), Matrixfilm
NIM	Network Injection Moulding	RTM Variante von FIBRELITE, Niederdruckpresse, hohe Injektionsrate, geringer -druck und kurze Zyklen
ICS ARTM	Injection Compression Sotira Advanced RTM	RTM mit Pressdruck, von SOTIRA kombiniertes RTM- und Pressverfahren, Injektion vor vollständigem Schließen des WZ mittels Presse
ICLCM AMP	Injection Compression LCM Advanced Moulding Process	dito
TE-RTM RARTM UVRTM	Thermal Expansion RTM Rubber-Assisted RTM Ultra-Violet-Cure-RTM	Einbringen von mit Matrix getränktem Faserhalbzeug ins offene beheizte Werkzeug (Nasspressen), HEXCEL RTM mit expandierendem Kern, Hohlteile Wie TE-RTM, mit Elastomer-Kern Vakuumsackverfahren ähnlich SCRIMP mit transparenter Folie zur UV-Aushärtung des Harzes
RIM	Reaction Injection Moulding	reaktives Gemisch (z.B. PUR) wird mit hohem Druck (z.B. >20bar) in Form gespritzt
SRIM, S-RIM	Structural RIM	Faser-Preform, Einlegen, anschl. Injektion ins geschlossene Werkzeug
HDSRIM	High Density SRIM	Matrix mit hoher Dichte, hohe mech. Eigenschaften
LDSRIM	Low Density SRIM	Matrix mit geringerer Dichte
RRIM	Reinforced RIM	RIM mit Glaskurzfasern (L<2mm) oder „Glasflocken“
PA-RIM	Polyamid-RIM	Polymerisation des TP nach Einspritzen, (Caprolactam)
NYRIM	Nylon (PA)-RIM	dito
EPM		Injektionsverf. mit PA12-Polymerisation (EMS-Chemie)
GMFU	Glas Mat Fiber Urethane	Faser-Preform, Einlegen, Injektion von PU ins offene Werkzeug, Aufschäumen
FVT	Faserverstärkte Thermoplaste	Faser-Kunststoff-Verbund mit thermoplastischer Matrix
GMT	Glasmattenverstärkte TP	Thermoformen von glasfaserverstärktem Thermoplast, Kurzfasern, Langfasern, Wirrfasern, oder auch „Organobleche“, endlosfaserverstärkter TP z.B. mit Gewebebelagen (< 10bar Umformdruck)
LFT, LFRT	Langfaserverstärkte TP	TP-Pressmasse mit Faserverstärkung (ähnlich BMC)
CMT	Carbonfasermattenverstärkte TP	TP-Thermoformen von DUPONT, z.B. Carbon/PEEK
XTC	...Thermoplastic Composites	TP-Thermoformen mit Glas-Langfasern (25- 40%, L=25mm), PET, von DUPONT
XTC-S	...Thermoplastic Composites -S	TP-Thermoformen mit (Billig-)Kohlefasern (bis 50%), NIST-Projekt USA, von DUPONT
ATC	Advanced Thermoplastic Composites	thermoplastische Hochleistungs-Verbunde
LCM	Liquid Composite Moulding	(Flüssig-)Injektionsverfahren wie RTM, RIM,..
LM	Liquid Moulding (Process)	dito
LCCM	Liquid Compression Composite Moulding	Nasspressen
ICLCM CM, CCM	Injection Compression LCM Compression (Composite) Moulding	Kombination aus Injektions- und Pressverfahren Press- (Druck-Umform-)Verfahren wie SMC, BMC

## 11.4 Anhang D: Ausschnitt aus der Verfahrensübersicht

		Injektionsverfahren, LCM ....		
Verfahren Kriterien		Structural RIM (SRIM)	Resin Transfer Moulding (RTM), Advanced RTM (ARTM), Injection Compression Moulding (ICM)	
Werkstoffqualitäten, Materialien	Matrixwerkstoffe	Hochreaktive Harzsysteme: hauptsächlich PUR- Systeme, auch EP, PA, UP <sup>(12)</sup>	Duromere: hauptsächlich EP, UP, VE, auch BI, PI; spezielle schnellhärtende Low-Profile-Systeme mit niedriger Viskosität	
	Faserwerkstoffe	Alle Fasertypen	Alle Fasertypen (Glas-, Kohlenstoff-, Aramidfasern...)	
	Verstärkungs- arten	Alle Verstärkungsarten, meist Faserpreforms, auch Schnittfasern 12-100 mm (LFI), auch Füllstoffe	Glas-Wirrfasermatten, geschnitten / endlos, Faserpreforms Endlosverstärkungen wie Gelege, Gewebe, Gestricke... Faserpreforms	
	Faservolumen- gehalt, Dichte	z.B. Class-A-SRIM (PUR) 30 Gew% <sup>(11)</sup> , 1,42 – 1,58 g/cm <sup>3</sup>	bis zu 35 Vol% (theoretisch noch höher) 1,5 – 1,8 g/cm <sup>3</sup> CFK	bis zu 60 Vol% (theoretisch noch höher) 1,4 – 1,6 g/cm <sup>3</sup> CFK
	Steifigkeit, E-Modul	Z.B. 30% Glasfaserplatte 9.300 – 9.700 MPa <sup>(11)</sup> , 1500 – 3200 MPa <sup>(30)</sup>	GFK, CFM 35V% (quasisotrop): 12.500 MPa	C-Gelege (UD): 110.000 MPa bei 60 V% 90.000 MPa bei 40 V% C-Gelege (bidirektional): 60.000 MPa bei 60 V% 35.000 MPa bei 40 V%
	Thermischer Ausdehnungs- koeffizient, Wärmeform- beständigkeit	18,6 – 21,1 x10 <sup>-6</sup> /K, 14 x10 <sup>-6</sup> /K <sup>(27)</sup> abhängig vom Harzsystem, z.B. 200°C <sup>(11)</sup>	Abhängig vom Glasanteil und Harzsystem, z.B. 19 x10 <sup>-6</sup> /K	Abhängig von Verstärkungsfasern und - art z.B. 0-10 x10 <sup>-6</sup> /K

Bauteilqualitäten	Bauweisen	Durch schäumende Systeme direkt Sandwichtaufbau möglich, ansonsten wie RTM	Monolithische Schalen; Rippen und lokale Verstärkungen möglich; Sandwich mit allen Kernmaterialien; Hohlräume mit Aussteifungen, Stegen...
	Formenvielfalt, Gestaltungsfreiheit	Wie RTM	Sehr hoch, keine Begrenzung der Bauteiltiefe, nur Entformbarkeit gefordert (aber mehrteilige Formen denkbar), Kerne möglich (verlorene Schaumkerne, Wachskerne...), Hohlräume möglich (TER, Schlauchblasverfahren...)
	Integrationsmöglichkeiten (Inserts, Verstärkungen...)	Wie RTM	Inserts aller Art, lokale Verstärkungen (Faserstränge, Einlegeteile...) und Aufdickungen (Doppler, Krafteinleitungen...), Rippen, Profile, Schaumkerne vernähte oder 3D-verstärkte Strukturen
	Wanddicken	Wie RTM, evtl. Problem mit Porosität bei dünnen Wandstärken	Fertigungsbedingt (Permeabilität der Faserverstärkung): Möglich 0,7- > 20 mm, meist 1,5 - 3 mm
	Oberflächenqualität	Class A lackiert in Versuchsreihen <sup>(11)</sup> laut Hersteller, fraglich (Poren, Abzeichnen)	Class A lackiert in Versuchsreihen, mit besonderen Maßnahmen möglich, z.B.: Vliese, Gelege, Prozessparameter, Gelcoat möglich, ARTM zeigt bessere Oberflächen
Prozess	Zykluszeit / Stückzahl	PUR bis zu 60sec <sup>(11)</sup> , 60 - 120 sec <sup>(12)</sup> , typ. Stückzahlen um 60.000, ins offene WZ länger, > 2min	Gesamtzykluszeiten für EP-RTM zwischen 8 und 30 min, Perspektive 5 min. Injektion zwischen 15 und 120 sec (ARTM schneller), Aushärtung zwischen 4 und 25 min, evtl. Nachhärtung (Tempern) notwendig
	Automatisierungsgrad	Hoch, industriell umgesetzt, immer geringer als TP wegen Faserverstärkung	Zur Zeit nur in Einzelfällen industriell umgesetzt, Automatisierung in hohem Grade möglich, immer geringer als bei UTP
	Verarbeitungstemperatur	Je nach Material, Material 30 - 75°C <sup>(13,26)</sup> , Werkzeug 70 - 100°C <sup>(13)</sup>	Materialabhängig: Material bis 80°C, Werkzeug bis 120°C
	Injektionsdruck / Vakuum / Pressdruck	Je nach Material und evtl. Schaumanteil, z.B. Vordrücke 10 - 20 MPa <sup>(13)</sup> , Injektionsdrücke 20-50 bar (2-5 MPa <sup>(11)</sup> )	Evtl. Vakuum an Kavität bis -0,9bar (-0,09MPa) <sup>(13)</sup> , Injektionsdruck 1-7 bar (0,1-0,7MPa) <sup>(12)</sup> , Bei ARTM, ICM wesentlich höhere Nachpressdrücke 5-50 bar
	Umweltbelastung Arbeitssicherheit	Geschlossener Prozess, aber hochreaktive Systeme	Geschlossener Prozess, aber chem. Reaktion, evtl. Belastung durch Hilfsmittel wie Trennmittel, Lösemittel
	Potenzial	Höherer Faservolumengehalt (S); Eliminierung von Poren (S,O); Nachdruck ins WZ (O); ansonsten wie RTM	Low-Profile-Harzsysteme (O); schnellhärtende Harze (Z); spezielle Oberflächenvliese (O); Gelegeentwicklung (O); Prozessparameter (O); Preform-Technologie (Z, S); geringe Wandstärken (S);
Materialbeispiele, Bauteilbeispiele	Baypreg (Bayer), Elastoflex (Elastogran), Struchan-Sandwich; Instrumententafel BMW Ser aus PUR (Sandwich)	Ford-Heckspoiler, Aston-Martin Klappen, Van-Hochdächer Araldite von CIBA, Epikote von SHELL; Unimog-Fahrerhauskabine, SSW-Karosserieteile (Ferrari F40, McLaren F1)	

11.5 Anhang E: Aushärteverhalten für betrachtete EP-Systeme

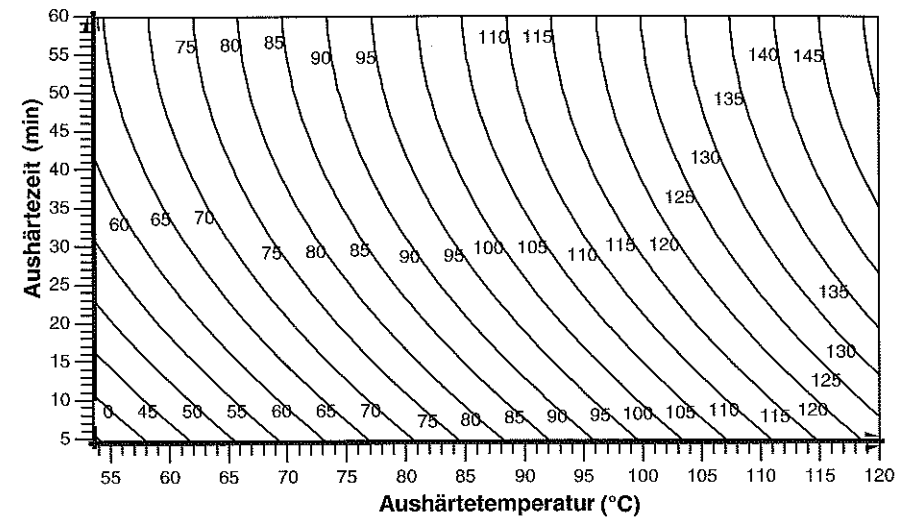


Abbildung 11.1: T<sub>g, mittel</sub> über Aushärtezeit und -temperatur für das Harz-Härter-System A1

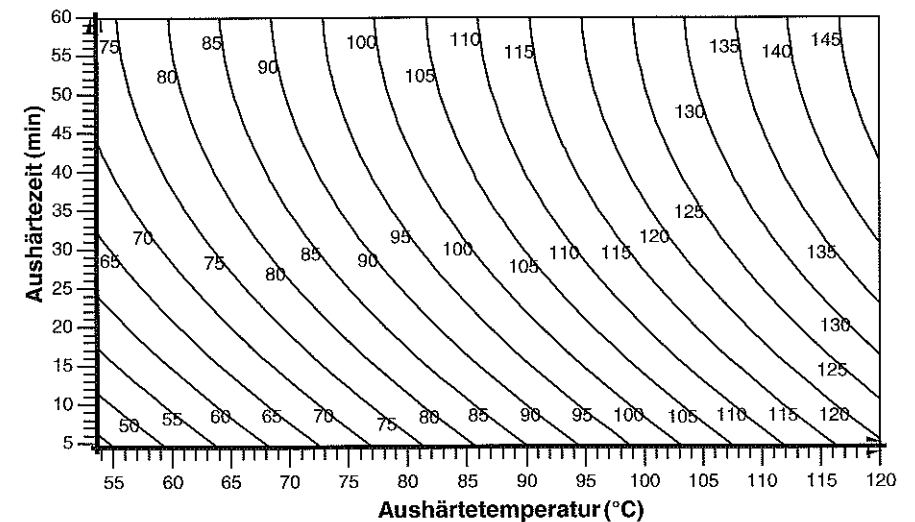


Abbildung 11.2: T<sub>g, mittel</sub> über Aushärtezeit und -temperatur für das Harz-Härter-System B2

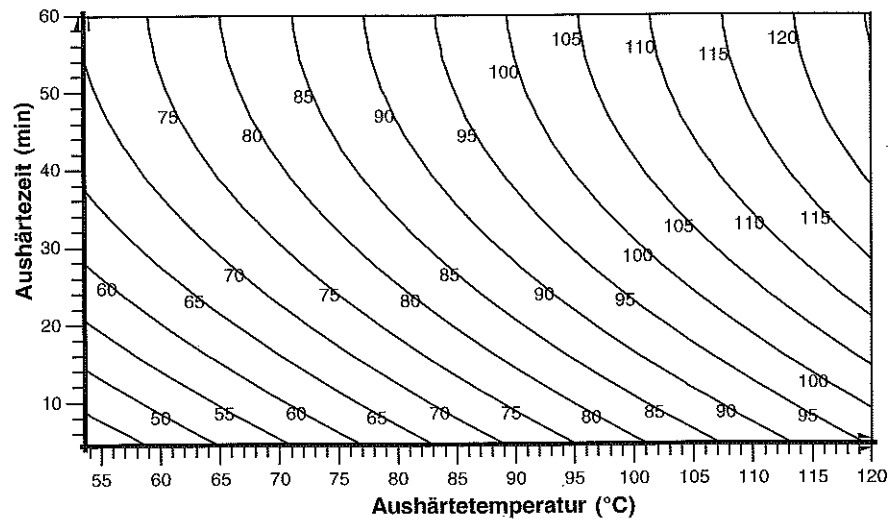


Abbildung 11.3:  $T_{g,mittel}$  über Aushärzeit und -temperatur für das Harz-Härter-System C4

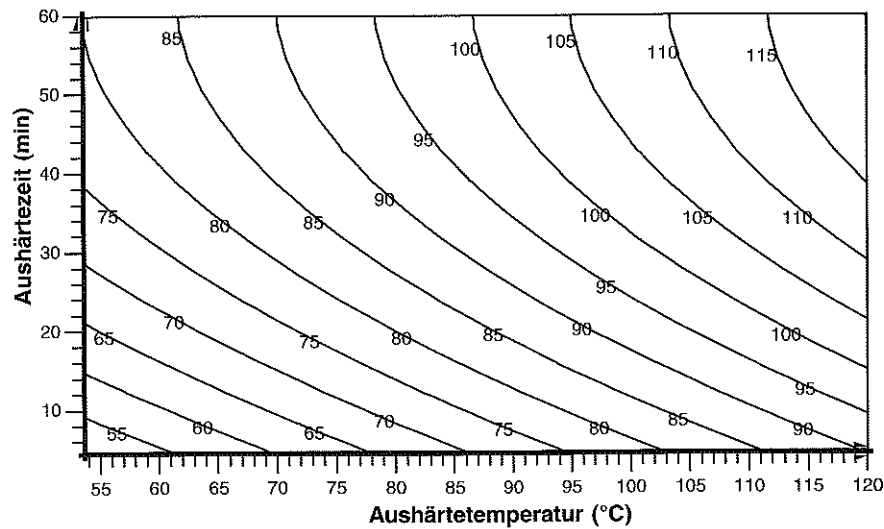


Abbildung 11.4:  $T_{g,mittel}$  über Aushärzeit und -temperatur für das Harz-Härter-System D5

### 11.6 Anhang F: Multiaxialgelege-Maschine Typ Copcentra (Firma Liba)

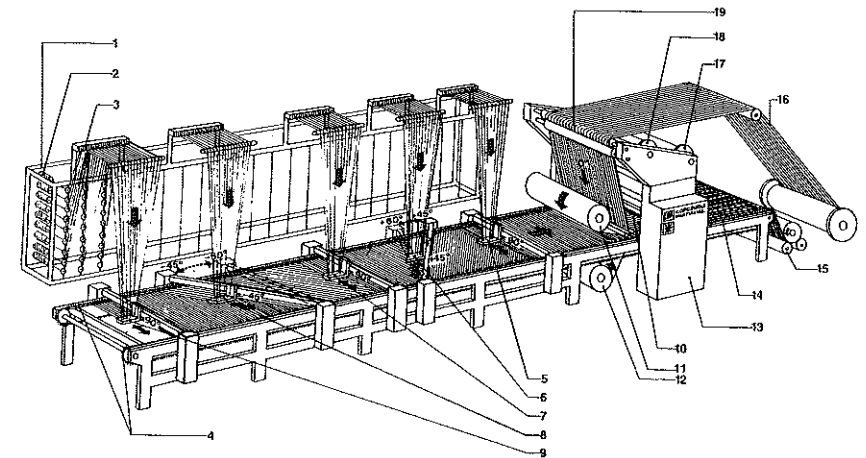


Fig. 4: COPCENTRA MULTI-AXIAL

- Kettenwirkmaschine mit 5 Schußeintragssystemen
- Warp knitting machine with 5 weft insertion systems

1. Spulengatter für Schußfäden / Creel for weft yarns
2. Spulen / Cones
3. Fadenbremsen / Yarn brakes
4. Längsförderer-Transportkette / Transport chains
- 5./7./9. Schußeintragssystem 90° / Weft insertion system 90°
6. Schußeintragssystem +45° / Weft insertion system +45°
8. Schußeintragssystem -45° / Weft insertion system -45°
10. Wirkelemente / Knitting elements
11. Vlieszuführung oben / Non-woven feeding system top
12. Vlieszuführung unten / Non-woven feeding system bottom
13. Wirkmaschine / Knitting machine
14. vernähte Ware / finished fabric
15. Warenaufrollung / Fabric take-up
16. Stehfäden 0° / Pillar threads 0°
- 17./18. Kettfäden / Knitting yarns
19. Stehfaden-Zuführwalzen / Delivery rollers for pillar thread

### 11.7 Anhang G: Statistische Methoden zur Versuchsplanung und -auswertung

In der technischen Statistik wird zwischen zwei Arten von Messgrößen unterschieden, den Einflussgrößen (engl. „factors“) und den Zielgrößen (engl. „responses“). Es kann das in Abbildung 11.5 gezeigte schematische Prozessmodell gebildet werden. Dabei geht man davon aus, dass mit Veränderung der Einflussgrößen der Prozess so beeinflusst werden kann, dass auch die Zielgrößen sich mit verändern. Leider werden die Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen sowohl durch Messfehler als auch durch nicht bekannte oder nicht gemessene Störgrößen überlagert oder verrauscht. Ziel ist es, solche Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen zu ermitteln, die aus dem Rauschen heraus identifizierbar sind und so den Prozess beschreiben können. Aus einer Analyse des Rauschens können weitere Erkenntnisse über Besonderheiten in den Daten gewonnen werden, wie verborgene Faktoren oder Ausreißer.

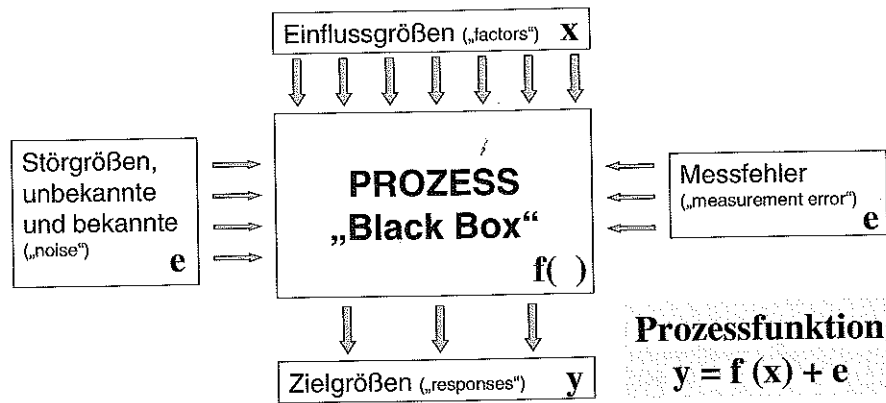


Abbildung 11.5: Schematisches Prozessmodell

Der Prozess wird in diesem Modell als „Black Box“ behandelt, welche die Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen bewirkt. Die Beschreibung dieser Zusammenhänge mittels naturwissenschaftlicher Gesetze und Gleichungen (z.B. aus der Mechanik, Thermodynamik oder Reaktionskinetik) ist aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen und der Komplexität der Prozesse nur selten möglich. Daher wird das Verhalten der Black Box durch ein mathematisches Modell beschrieben, das sowohl die Zielgrößen als Funktionen der Einflussgrößen als auch die auftretenden Abweichungen vom Modell erklärt.

Bei dem Verfahren der multiplen Regression liegt diesen Modellen der in Abbildung 11.6 gezeigte Funktionsansatz einer Taylorentwicklung zugrunde. Mit der Taylorentwicklung wird bis zum angegebenen Grad (hier z.B. quadratisch) die tatsächliche Funktion aus den gemessenen Werten angenähert. Da eine Verrauschung der gemessenen Werte vorliegt, wird eine bessere Modellbildung in der Regel sowieso verhindert.

$y =$	$c$	Konstante
	$+ a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_p * x_p$	Haupteffekte (HE), lineare Terme
	$+ a_{11} * x_1^2 + a_{22} * x_2^2 + \dots + a_{pp} * x_p^2$	Quadratische Effekte (QE), quadr. Terme
	$+ a_{12} * x_1 * x_2 + \dots + a_{p-1p} * x_{p-1} * x_p$	Zweifach-Wechselwirkungen (2WW)
	$+ a_{111} * x_1^3 + a_2 * x_2 + \dots$	Effekte höherer Ordnung

Abbildung 11.6: Funktionsansatz nach Taylor

Für die auftretenden Fehler aus Messfehlern und Störgrößen wird eine stetige und statistische, also auf zufälliger Auswahl basierende, Verteilung angenommen. Aus der Wahrscheinlichkeitstheorie begründet sich die Wahl der Normalverteilung: „Ergebnis einer Verteilung als Summe vieler kleiner Streuungsursachen, von denen keine dominant ist, und die sich gegenseitig nicht zu stark beeinflussen, so folgt die resultierende Summe der Normalverteilung.“ Da in der vorliegenden Arbeit die einzelnen Versuche wie Stichproben aus einer normalverteilten Grundgesamtheit zu betrachten sind, gelten die in Abbildung 11.7 und Tabelle 11.1 dargestellten Zusammenhänge für alle ermittelten Ergebnisse.

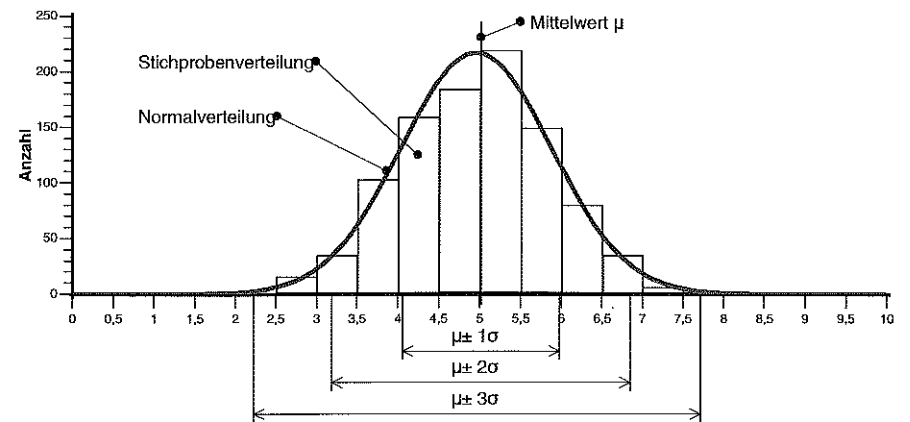


Abbildung 11.7: Normalverteilung und Überdeckungsbereiche

Der Schluss von der Stichprobe auf die (in jeglicher Art verteilte) Grundgesamtheit ist immer mit Unsicherheit behaftet. Zur Erfassung dieser Unsicherheit werden Vertrauensbereiche errechnet (siehe Tabelle 11.1). Daraus ergeben sich für die Normalverteilung die Überdeckungswahrscheinlichkeiten, die in Abbildung 11.7 gezeigt sind.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse bedeutet dies, dass ein weiterer Versuch mit gleichen Parametern mit einer Wahrscheinlichkeit von z.B. 95,55 % in einem Bereich mit einer Abweichung von  $\pm 2$  SD vom errechneten Wert liegen wird. In den Diagrammen der folgenden Auswertung sind diese Vertrauensbereiche mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % mit angegeben und zeigen so die vom Modell erwartete bzw. unzureichend erklärte Streuung.

Tabelle 11.1: Statistische Kenngrößen zur Beschreibung der Streuung

Größe	Formel	Bemerkung
Theoretischer Mittelwert	$\mu$	Für Normalverteilung
Theoretische Standardabweichung	$\sigma$	Für Normalverteilung
Stichproben-Mittelwert	$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$	Für Stichproben
Stichproben-Standardabweichung	$SD_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	Für Stichproben
Vertrauensbereich	$\bar{y} \pm \frac{SD}{\sqrt{n}} \cdot t_{n-1; 1-\frac{\alpha}{2}}$	$t \approx 2$ für Vertrauensintervall von 95%

Der Grundstein für die statistische Versuchsmethodik liegt in der umfassenden Systemanalyse. Ziel ist die Formulierung der Einflussgrößen, Zielgrößen und möglicherweise der Störgrößen (siehe Abbildung 11.5). Aus Expertenwissen werden bereits bekannte Zusammenhänge, wie Einflussgrößen und Wechselwirkungen, gewonnen. Wichtig ist die Formulierung der Messmethoden und -bereiche für die Einfluss- und Zielgrößen.

Aus der Systemanalyse ergibt sich auch der Modellansatz für die Versuchsplanung (siehe Abbildung 11.6). Je nach Versuchsaufwand und vorhergesagtem Systemverhalten werden Funktionen mit linearen und quadratischen Effekten sowie mit Wechselwirkungen angesetzt. Modelle höherer Ordnung sind nur bei besonderen Problemstellungen sinnvoll, aber immer möglich.

Zur optimalen Planung der Versuche für maximale Aussagekraft und minimalen Versuchsaufwand bieten sich verschiedene Methoden aus der statistischen Versuchsplanung (engl. „Design of Experiments“, DOE) an. Dabei spannen die  $p$  Einflussgrößen einen  $p$ -dimensionalen Versuchsraum auf, der durch die Versuche möglichst gut abgedeckt werden soll. Für die Bildung von linearen Funktionen für das mathematische Modell sind jeweils mindestens 2 Stützpunkte notwendig, für quadratische Funktionen mindestens 3. Dies ergibt bei Abdeckung aller Variationen aller Einflussgrößen sogenannte vollfaktorielle Versuchspläne mit  $2^p$  bzw.  $3^p$  notwendigen Versuchen. Zur Versuchsplanung mit geringerem Aufwand bieten sich zahlreiche mögliche Versuchspläne mit unterschiedlichen Merkmalen an.

Die D-optimalen Versuchspläne stellen einen optimalen Kompromiss zwischen der Aussagekraft der Versuche und dem Versuchsaufwand dar. Mit ihnen sind alle Modellsituationen darstellbar, also lineare Effekte, quadratische Effekte, Wechselwirkungen und Terme höherer Ordnung. Sie sind flexibel anpassbar an beliebige individuelle Modelle, Einschränkungen im Versuchsraum, verschiedene Faktorenarten und bereits vorhandene Versuchsdaten. Die Planung der Versuche wird mit Hilfe eines rechnergestützten Statistik-Programms durchgeführt. Dazu ist die vorherige Analyse des zu betrachtenden Systems notwendig. Die Einfluss- und Zielgrößen und der Modellansatz werden definiert. Über eine Optimierung des Versuchsaufwands im Verhältnis zur

Versuchsraumabdeckung ermittelt das Programm mittels Matrizenrechnung einen D-optimalen Versuchsplan. Die Reihenfolge der Versuche wird randomisiert, um den Einfluss unberücksichtigter, zeitabhängiger Faktoren zu minimieren.

Bei der Versuchsdurchführung muss auf genaue Dokumentation aller Einflussgrößen und evtl. weiterer Störgrößen geachtet werden. Abweichungen von den vorgegebenen Einstellungen der Einflussgrößen führen zwar zu einer etwas schlechteren Versuchsraumabdeckung, stören aber die Auswertung nicht wesentlich. Zusätzliche Versuche oder Versuchswiederholungen erhöhen die Anzahl der Freiheitsgrade und die Aussagekraft über Modell und Streuung.

Die Auswertung der gewonnenen Versuchsdaten ist ebenfalls nur rechnergestützt möglich. Die Statistiksoftware ermittelt nach der Methode der kleinsten Quadrate die Koeffizienten für den Modellansatz (siehe Abbildung 11.6). In der Methode der schrittweisen Regression wird nun das mathematische Modell bestmöglich an die Versuchsdaten angepasst. Je nach Signifikanz werden die Terme der linearen Effekte, der quadratischen Effekte und der Wechselwirkungen im Modell belassen oder entfernt. Durch Variablentransformation kann die Modellgüte meist angehoben werden. Iterativ werden alle Terme immer wieder auf ihre Signifikanz geprüft und ins Modell integriert oder aus diesem eliminiert. Ziel ist hier ein möglichst hohes Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches gleichbedeutend ist mit dem Anteil der Ausgangsstreuung, der durch die Regression erklärt wird. Eine Analyse der Reststreuung zeigt, ob einzelne Ausreißer oder systematische Abweichungen der Verteilung von der Normalverteilung vorliegen. So können die Versuchsdaten auf unberücksichtigte Einflussgrößen, Störgrößen und zeitliche Effekte hin untersucht werden.

Sobald das Modell mit der schrittweisen Regression angepasst worden ist, kann die Modellanalyse erfolgen. Die Auswirkungen der einzelnen Einflussgrößen auf die Zielgrößen können dargestellt werden, ebenso die Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen. Dabei sind Darstellung und Erfassung der Zusammenhänge zwischen mehreren Einflussgrößen im  $p$ -dimensionalen Versuchsraum und mehreren Zielgrößen problematisch. Diese Schwierigkeit wird durch Matrixdarstellungen, mit Diagrammen für mehrere Einfluss- und Zielgrößen gleichzeitig, überwunden. In einer Optimierungsgrafik sind alle Zielgrößen in Abhängigkeit aller Einflussgrößen dargestellt. Die Veränderungen der Zielgrößen werden direkt bei Veränderung der Einflussgrößen durch den Benutzer angezeigt.

Das Modell bietet die Möglichkeit der Optimierung auf bestimmte Zielfunktionen hin. So können bei mehreren Zielgrößen Gewichtungen, Maximal-, Minimal- und Zielwerte bestimmt und zu einer Wünschbarkeitsfunktion zusammengefasst werden. Bei starken Wechselwirkungen im Modell kann das Optimierungsergebnis vom Startwert abhängen, da die Optimierung z.B. nach nur einer Zielgröße gemäß der Gradienten im  $p+1$ -dimensionalen Werteraum abläuft. Für zwei Einflussgrößen und eine Zielgröße entspricht dies dem Rollen einer Kugel auf einer in mehreren Richtungen gekrümmten Fläche im  $x$ - $y$ - $z$ -Raum. Die Optimierung kann so zu lokalen Maxima und Minima, wie Tälern oder Erhebungen dieser Fläche, führen.



## 11.8 Anhang H: Signifikanztabelle für RTM-Prozessmodell

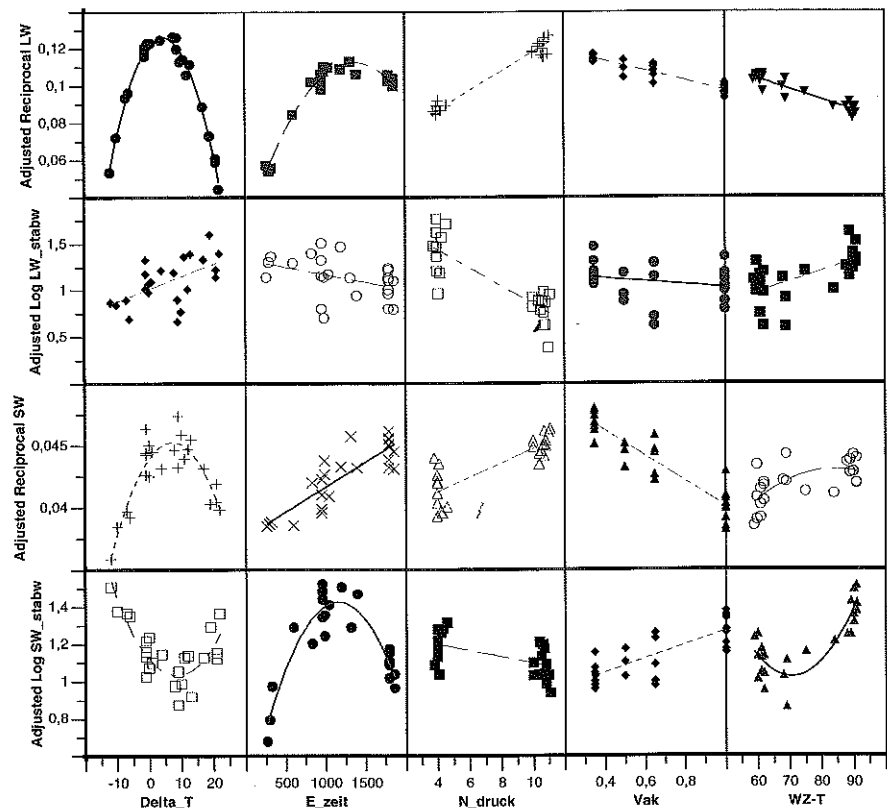
Term Significance

Term	Reciprocal LW	Log LW_stabw	Reciprocal SW	Log SW_stabw
Constant	0,00292643 1 df In	0,0346146 1 df In	0,985228 1 df In	0,0728326 1 df In
WZ-T	3,64204e-05 1 df In	0,171634 1 df In	0,196963 1 df In	0,0440740 1 df In
Delta_T	0,270093 1 df In	0,0999353 1 df In	0,192279 1 df In	0,000948492 1 df In
Vak	0,0139144 1 df In	0,0756442 1 df In	0,00889146 1 df In	0,00189483 1 df In
N_druck	0,00998270 1 df In	0,440510 1 df In	0,00454827 1 df In	0,554777 1 df In
E_zeit	0,000177410 1 df In	0,0194490 1 df In	0,0224243 1 df In	0,178586 1 df In
WZ-T^2	0,866233 1 df Out	0,0846697 1 df Out	0,566658 1 df In	0,0614193 1 df In
Delta_T * WZ-T	0,000559752 1 df In	0,401344 1 df Out	0,0768971 1 df In	0,733929 1 df Out
Vak * WZ-T	0,00359336 1 df In	0,381651 1 df Out	0,686581 1 df Out	0,476644 1 df Out
N_druck * WZ-T	0,00122971 1 df In	0,818489 1 df Out	0,887876 1 df Out	0,540375 1 df Out
E_zeit * WZ-T	1,88591e-06 1 df In	0,0276678 1 df In	0,000514806 1 df In	0,0241710 1 df In

Term Significance

Term	Reciprocal LW	Log LW_stabw	Reciprocal SW	Log SW_stabw
Delta_T^2	5,20033e-05 1 df In	0,773127 1 df Out	0,0529478 1 df In	0,0628622 1 df In
Delta_T * Vak	4,13911e-06 1 df In	0,0243469 1 df In	0,000706681 1 df In	0,813385 1 df In
Delta_T * N_druck	0,199219 1 df Out	0,795221 1 df Out	0,665727 1 df In	0,0368141 1 df In
Delta_T * E_zeit	0,000792326 1 df In	0,815374 1 df Out	0,0667428 1 df In	0,000501936 1 df In
Vak^2	0,554063 1 df Out	0,150349 1 df Out	0,868270 1 df Out	0,343108 1 df Out
N_druck * Vak	0,000130021 1 df In	0,0121516 1 df In	0,0480648 1 df In	0,671892 1 df Out
E_zeit * Vak	0,000781871 1 df In	0,935182 1 df Out	0,0197613 1 df In	0,00227747 1 df In
E_zeit * N_druck	0,000100329 1 df In	0,376744 1 df Out	0,000973766 1 df In	0,421691 1 df In
E_zeit^2	0,00431457 1 df In	0,840970 1 df Out	0,101696 1 df Out	0,00546223 1 df In
<b>R-Square</b>	<b>0,9948</b>	<b>0,7600</b>	<b>0,9625</b>	<b>0,9455</b>
<b>Adj R-Square</b>	<b>0,983041</b>	<b>0,631931</b>	<b>0,892255</b>	<b>0,860603</b>
<b>RMS Error</b>	<b>0,005247259</b>	<b>0,246510335</b>	<b>0,002113379</b>	<b>0,13575917</b>
<b>Residual df</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>9</b>

11.9 Anhang I: Adjustierte Response-Grafiken



**Bemerkung:**

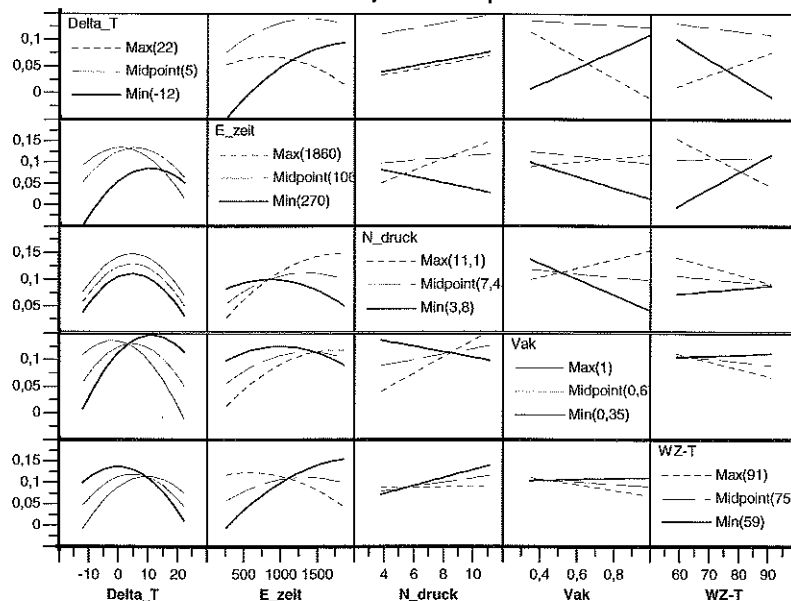
In diesem Diagramm sind die transformierten Zielgrößen dargestellt. Zur Verbesserung des Regressionsmodells wurden die Faktoren wie folgt transformiert und wie folgt neu benannt:

Zielgröße	Transformation auf	Neuer Name
LW	Kehrwert 1/LW	Reciprocal LW
LW_stabw	Logarithmus log(LW_stabw)	Log LW_stabw
SW	Kehrwert 1/SW	Reciprocal SW
SW_stabw	Logarithmus log(SW_stabw)	Log SW_stabw

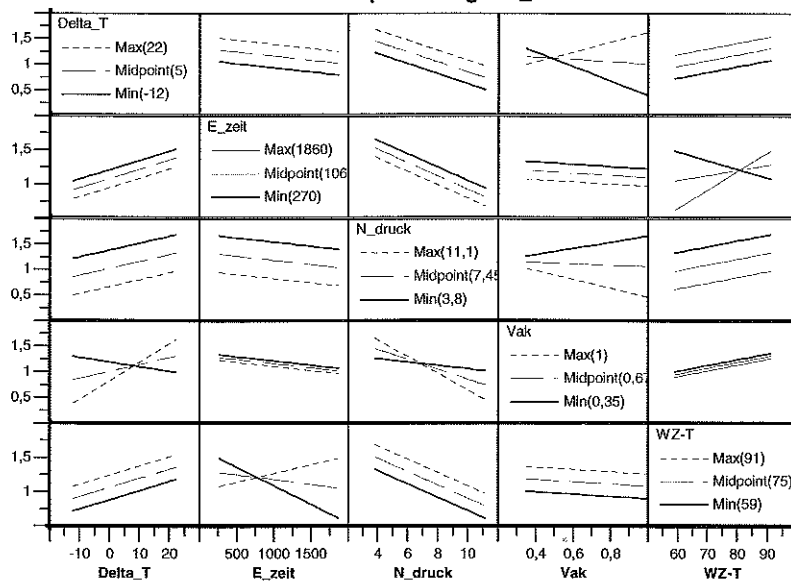
Daher können hier dargestellten Zusammenhänge nicht wie gesehen auf die ursprünglichen Zielgrößen angewandt werden, sondern sind nur für die transformierten Größen gültig. Eine einfache Addition der Effekte oder ein direkter quantitativer Vergleich der Effekte ist deshalb nicht zulässig.

11.10 Anhang J: Wechselwirkungs-Grafiken für alle vier Zielgrößen

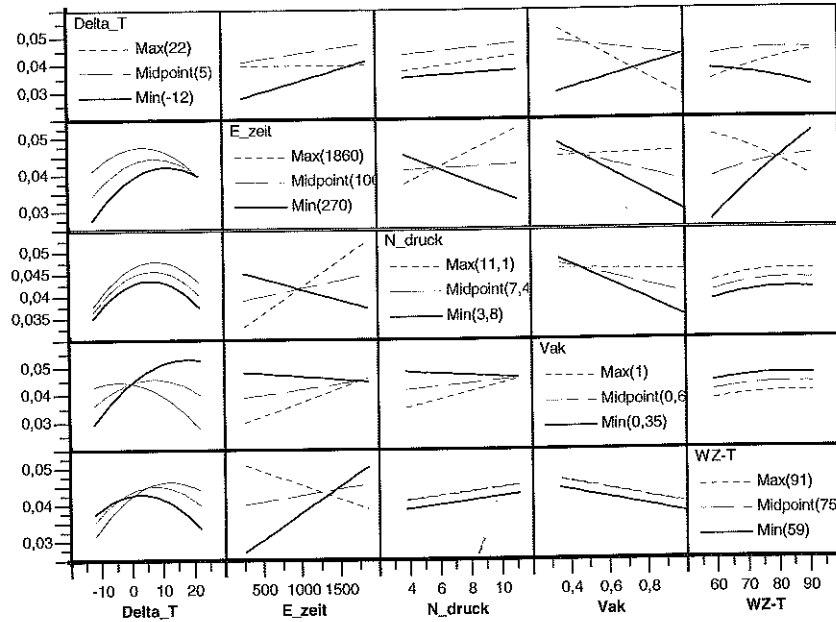
Interaction Graph for Reciprocal LW



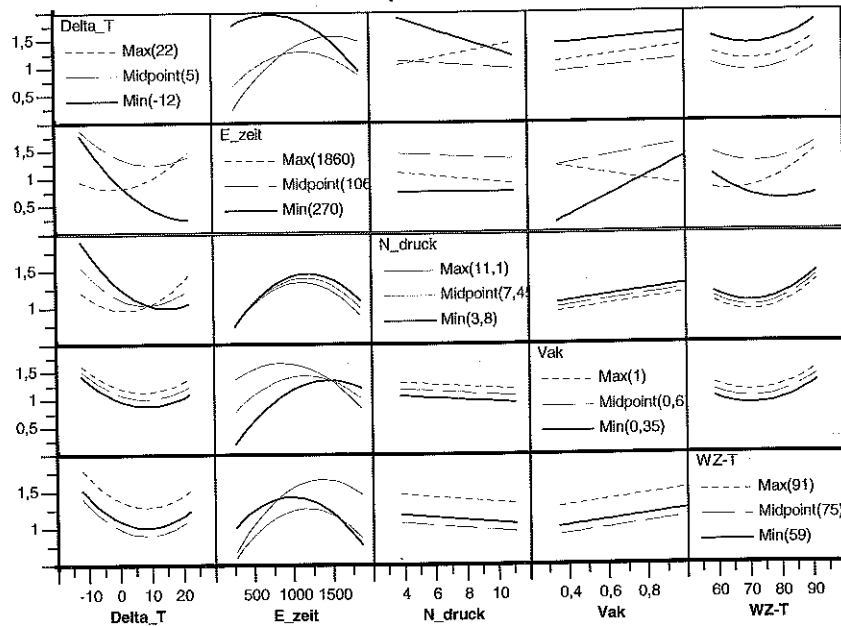
Interaction Graph for Log LW\_stabw



Interaction Graph for Reciprocal SW

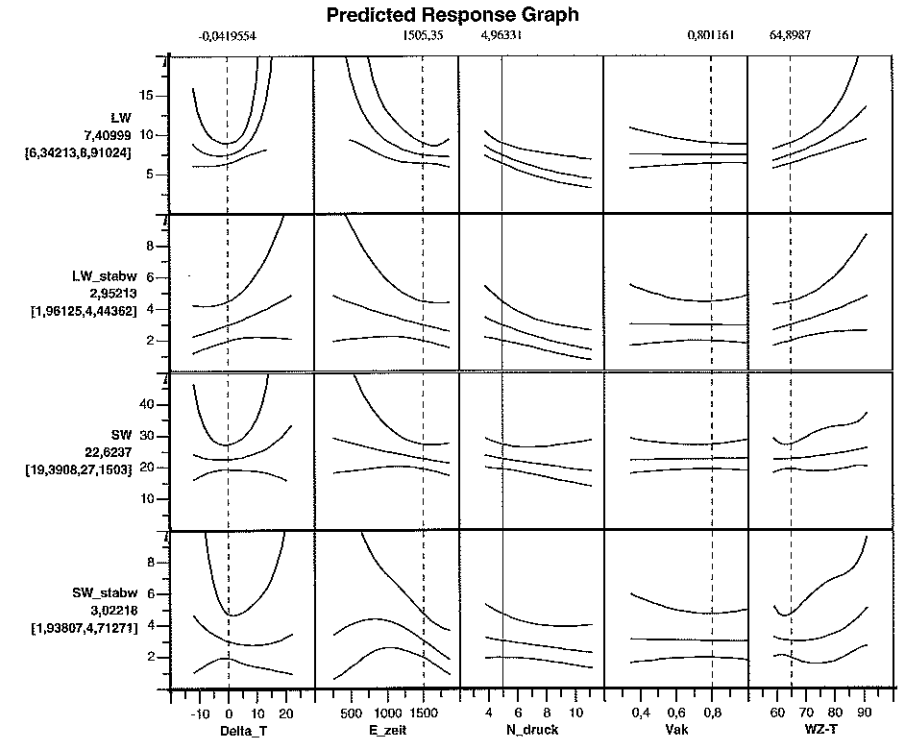


Interaction Graph for Log SW\_stabw

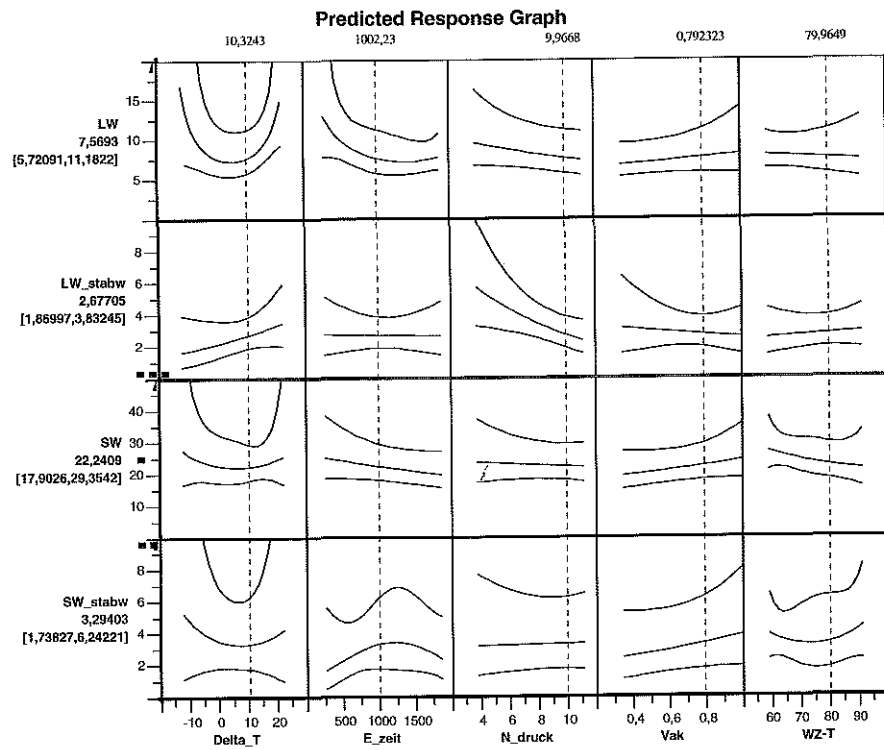


11.11 Anhang K: Predicted-Response-Grafiken an zwei Arbeitspunkten

Predicted-Response-Grafiken für Arbeitspunkt 1



Predicted-Response-Grafiken für Arbeitspunkt 2

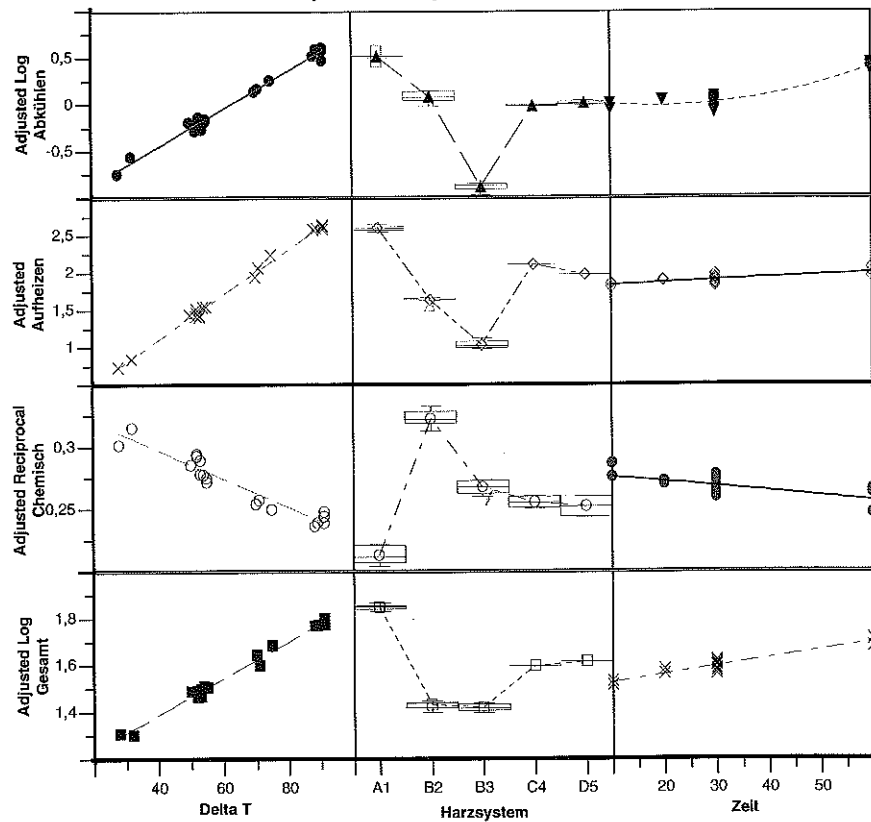


11.12 Anhang L: Ergebnisse aus den Schwindungsmessungen

Harz-system	Verarbeitungs-temperatur in °C	Aushärtezeit in min	Schwindungs-Ergebnisse (Beträge in %)					
			Start-Ende (%)	Delta T (°C)	Thermisch Aufheizen (%)	Chemisch (%)	Thermisch Abkühlen (%)	Verarbeitung gesamt (%)
A1	80	30	3,4	52	2,0	4,2	1,2	5,4
	80	60	3,7	52	2,2	4,4	1,5	5,9
	100	30	4,1	70	2,7	5,0	1,8	6,8
	120	10	3,8	91	3,5	5,2	2,1	7,3
	120	20	4,2	89	3,5	5,3	2,4	7,7
B2	120	30	4,6	88	3,5	5,5	2,6	8,1
	60	30	2,6	32	0,7	2,7	0,6	3,3
	60	60	2,6	28	0,7	2,9	0,4	3,3
	80	10	2,5	52	1,2	2,8	0,9	3,7
	80	20	2,6	50	1,2	2,9	0,9	3,8
	80	30	2,7	53	1,2	3,0	0,9	3,9
B3	100	30	2,6	71	1,8	3,2	1,2	4,2
	120	30	2,7	91	2,3	3,4	1,6	5,0
	80	30	3,1	54	0,8	3,6	0,3	3,9
	80	60	3,2	53	0,8	3,6	0,4	4,0
C4	100	30	3,2	75	1,3	4,0	0,5	4,5
	120	30	3,2	91	1,5	4,1	0,7	4,8
D5	80	30	2,8	55	1,8	3,8	0,8	4,6
	120	30	3,1	91	2,8	4,3	1,6	5,9
	80	30	3,1	55	1,6	3,9	0,8	4,7
	120	30	3,2	91	2,8	4,3	1,7	6,0

## 11.13 Anhang M: Adjustierte Response-Grafiken für Schwindungsmodell

Adjusted Response Graphs

**Bemerkung:**

In diesem Diagramm sind die transformierten Zielgrößen dargestellt. Zur Verbesserung des Regressionsmodells wurden die Faktoren wie folgt transformiert und wie folgt neu benannt:

Zielgröße	Transformation auf	Neuer Name
Aufheizen	keine Transformation	Aufheizen
Abkühlen	Logarithmus $\log(\text{Abkühlen})$	Log Abkühlen
Chemisch	Kehrwert $1/\text{Chemisch}$	Reciprocal Chemisch
Gesamt	Logarithmus $\log(\text{Gesamt})$	Log Gesamt

Daher können hier dargestellten Zusammenhänge nicht wie gesehen auf die ursprünglichen Zielgrößen angewandt werden, sondern sind nur für die transformierten Größen gültig. Eine einfache Addition der Effekte oder ein direkter quantitativer Vergleich der Effekte ist deshalb nicht zulässig.